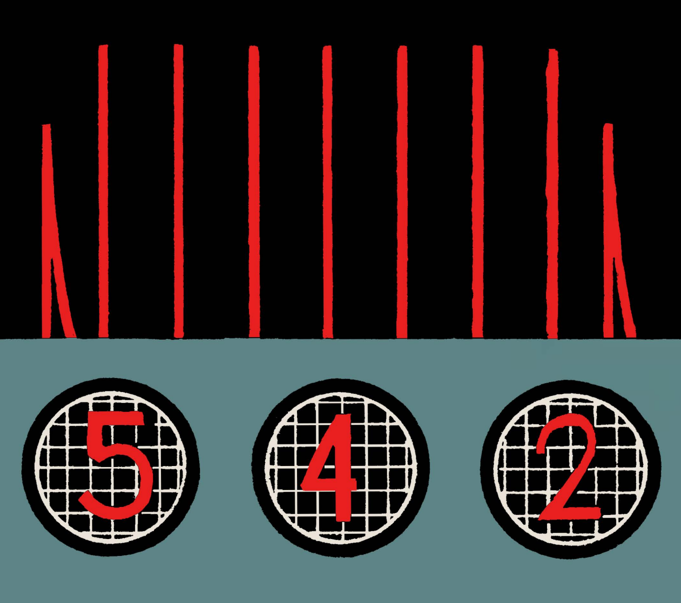
Г. Я. Мирский





ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ ИНТЕРВАЛОВ

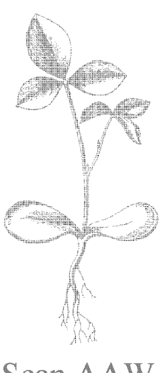
ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЭНЕРГИЯ»

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 511

Г. Я. МИРСКИЙ

ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ ИНТЕРВАЛОВ



Scan AAW

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА 1964 ЛЕНИНГРАД

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Берг А. И., Бурдейный Ф. И., Бурлянд В. А., Ванеев В. И., Геништа Е. Н., Джигит И. С., Жеребцов И. П., Канаева А. М., Кренкель Э. Т., Куликовский А. А., Смирнов А. Д., Тарасов Ф. И., Шамшур В. И.

УДК 621.317
М63

В книге излагаются методы измерения временны́х интервалов, рассматриваются функциональные схемы измерителей, а также некоторые типовые узлы и элементы измерительных схем. Приводятся сведения о цифровых методах измерения различных параметров электрических сигналов; использующих преобразование во временно́й интервал.

Предназначена книга для подготовленных радиолюбителей, студентов вузов и техникумов, а также инженерно-технических работников, интересующихся измерениями временны́х интервалов.

Мирский Григорий Яковлевич

Измерение временных интервалов.

М.—Л., Издательство «Энергия», 1964, 72 стр. с илл. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 511).

Темплан 1964 г. № 378

Редактор *С. М. Никулин* Техн. редактор *Н. А. Бульдяев*

Обложка художника *А. М. Кувшинникова*

Сдано в набор 27/XII 1963 г. Подписано к печати 24/II 1964 г
Т 00886 Бумага 84×108 1/32 3,69 п. л. Уч.-изд. л. 4,7.
Тираж 33 000 экз. Цена 19 коп. Зак. 1005

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Государственного комитета Совета Министров СССР по печати
Шлюзовая наб., 10.

ВВЕДЕНИЕ

В различных областях техники в настоящее время наблюдается тенденция к повышению быстродействия устройств, использованию процессов, протекающих с предельными скоростями, повышению разрешающей способности систем. Эта тенденция приводит к необходимости создания новой измерительной аппаратуры.

Решение многих научных и технических проблем связано с измерением интервалов, разделяющих два характерных момента какого-либо процесса. Такие измерения необходимы при разработке и испытании всевозможных схем задержки и синхронизации, при исследовании многоканальных систем с временны́м разделением каналов, применяемых в связи и радиотелеметрии, устройств радиотелеуправления, аппаратуры, используемой в ядерной физике, и т. д. Принцип измерения временны́х интервалов лежит в основе работы радиолокаторов, систем радионавигации, высотомеров, а также многих других приборов для измерения неэлектрических величин.

Задача измерения временны́х интервалов стала еще более актуальной в связи с применением в различных областях техники преобразований непрерывных (аналоговых) величин в дискретные. На преобразовании непрерывных величин в цифровые основано одно из главных направлений развития современной измерительной техники. Развитие этого направления привело к созданию прямопоказывающих приборов с цифровым отсчетом, облегчило автоматизацию процессов измерений.

Во многих случаях преобразование аналоговых величин в цифровой код осуществляется в результате промежуточного преобразования измеряемой величины во временной интервал.

В радиоэлектронике временны́е интервалы обычно задаются двумя импульсами. Условимся называть импульс, определяющий начало интервала, о п о р н ы м, а импульс, определяющий конец интервала, — и н т е р в а л ь н ы м.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

МЕТОДЫ ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКИХ РАЗВЕРТОК

1. КАЛИБРОВАННАЯ ЛИНЕЙНАЯ РАЗВЕРТКА

Если к горизонтально отклоняющим пластинам электронно-лучевой трубки приложено пилообразное отклоняющее напряжение, то под действием этого напряжения луч перемещается по горизонтальной прямой.

Перемещение l луча, называемое **развертк**ой, пропорционально отклоняющему напряжению $u_{откл}$:

$$l = h_г u_{откл}, \qquad (1)$$

где $h_г$ — чувствительность трубки к горизонтальному отклонению, *мм/в*.

В случае, когда напряжение изменяется прямо пропорционально времени, т. е. является линейной функцией времени,

$$u_{откл} = vt, \qquad (2)$$

где $v = U_m/T$ — скорость изменения пилообразного напряжения, определяемая его амплитудой U_m и длительностью T.

Перемещение луча связано со временем также линейной зависимостью

$$l = h_г vt = kt, \qquad (3)$$

где k — скорость развертки.

Для получения линейной зависимости перемещения луча от времени необходимо, чтобы скорость развертки была постоянной. Такую развертку называют линейной.

При измерении коротких временны́х интервалов применяют линейную ждущую развертку, калиброванную по длительности. Измерение временно́го интервала Δt сводится к измерению геометрического отрезка Δl, на который перемещается луч за время Δt.

Действительно, в соответствии с формулой (3) имеем

$$\Delta t = \frac{\Delta l}{k}.$$

Практически измерение осуществляют так. Опорный и интервальный импульсы, задающие измеряемый интервал Δt, подают на вход Y, т. е. канала вертикального отклонения, осциллографа со ждущей разверткой. Опорный импульс O запускает генератор ждущей развертки и поступает через линию задержки, имеющуюся в канале вертикального отклонения, на вертикально отклоняющие пластины трубки. Изображение этого импульса получается в начале развертки (рис. 1,*а*). Через промежуток Δt на вертикально отклоняющие пластины приходит интер-

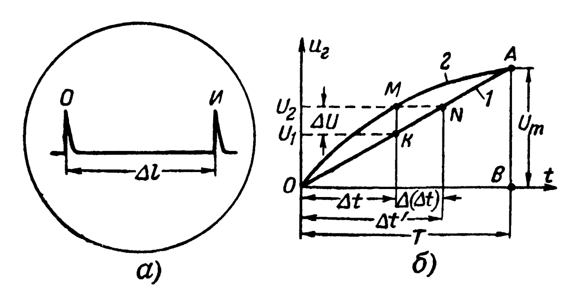


Рис. 1. К измерению временно́го интервала.

вальный импульс *И*. Его изображение сдвинуто от изображения опорного импульса O на расстояние Δl, которое луч успевает пройти за время Δt.

Из набора фиксированных *калиброванных* величин длительностей развертки, которые могут быть получены в данном осциллографе, выбирается длительность, позволяющая увеличить расстояние Δl до максимально возможной величины. Отрезок Δl обычно измеряют с помощью масштабной сетки, выполненной на прозрачном диске, установленном перед экраном трубки.

Метод определения временно́го интервала между изображениями опорного и интервального импульсов требует применения развертки не только со стабильной длительностью, но и с высокой линейностью, так как нелинейность прямого хода луча приводит к ошибками измерения. Чтобы оценить эту ошибку, рассмотрим рис. 1,*б*.

Из этого рисунка видно, что если бы на горизонтально отклоняющие пластины подавалось строго линейное напряжение, т. е. изменяющееся по прямой *1*, то за измеряемый интервал Δt напряжение возросло бы от 0 до U_1 (точка K). Но так как в действительности напряжение изменяется по кривой *2*, то через интервал Δt оно принимает значение U_2 (точка M), превышающее напряжение U_1 на величину ΔU.

Значению U_2 при линейном изменении напряжения (точка N) соответствует интервал $\Delta t' = \Delta t + \Delta(\Delta t)$. Поэтому, определяя временной интервал по перемещению луча в предположении, что развертка линейна, мы ошибаемся на величину $\Delta(\Delta t)$.

Из подобия треугольников OAB и NKM (рис. 1,*б*) легко установить, что

$$\frac{\Delta(\Delta t)}{T} = \frac{\Delta U}{U_m} \qquad (4)$$

или

$$\delta(\Delta t) = \delta U. \qquad (5)$$

Это означает, что приведенная ошибка[1] $\delta(\Delta t)$ измерения временно́го интервала Δt равна приведенной ошибке δU, вызванной отклонением реального развертывающего напряжения (кривая *2*) относительно идеальной «пилы». Максимальная погрешность определяется максимальным отклонением $(\Delta U)_{макс}$.

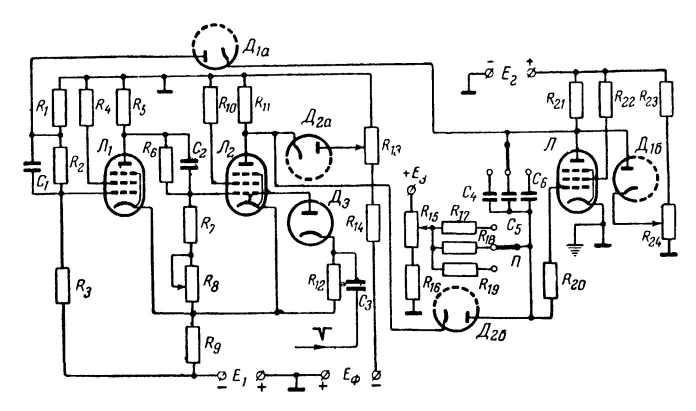


Рис. 2. Схема генератора калиброванной линейной развертки.

Выяснив сущность метода измерения, рассмотрим работу генератора линейной калиброванной развертки (рис. 2).

Пилообразное напряжение формируется на одном из конденсаторов набора C_4—C_6, например на конденсаторе C_5. Пока разрядная лампа $Л_3$ заперта, конденсатор C_5 заряжается до напряжения ее анода по цепи «плюс» источника E_2 — сопротивление R_{21} — конденсатор C_5 — сопротивления R_{18}, R_{15} и R_{16} — «минус» источника E_2 («земля»). Когда лампа $Л_3$ отпирается, конденсатор C_5 разряжается через ее внутреннее сопротивление R_{i3} и сопротивления R_{16}, R_{15} и R_{18}. После запирания лампы $Л_3$ конденсатор C_5 начинает заряжаться вновь. Так как $R_{i3} \gg R_{21}$, то постоянная времени цепи заряда $\tau_р = C_5(R_{i3}+R_{16}+R_{15}+R_{18})$ значительно больше постоянной времени цепи заряда $\tau_з = C_5(R_{21}+R_{18}+R_{15}+R_{16})$ и поэтому процесс разряда протекает намного

[1] Напомним, что приведенной ошибкой называется отношение абсолютной ошибки к верхнему (конечному) пределу шкалы прибора.

медленнее процесса заряда. Напряжение, формируемое при разряде конденсатора, используется для создания прямого хода луча. Оно получается весьма близким к линейному, что объясняется двумя причинами: работой на пологом участке анодной характеристики пентода (разряд почти постоянным током) и

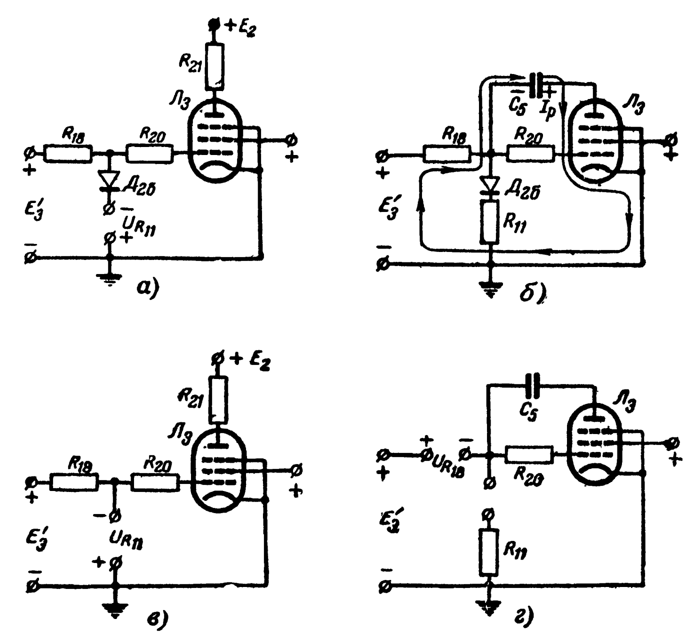


Рис. 3. Эквивалентные схемы, соответствующие двум положениям триггера Шмитта.

а и *в* — при отпертой лампе $Л_2$; *б* и *г* — при запертой лампе $Л_2$.

наличием обратной связи между анодом и управляющей сеткой пентода $Л_3$ (через конденсатор C_5), стабилизирующей разрядный ток.

Разрядная лампа $Л_3$ отпирается и запирается напряжением с выхода триггера Шмитта, выполненного на лампах $Л_1$ и $Л_2$. Триггер питается напряжением E_1, получаемым от выпрямителя, у которого заземлен положительный полюс (у выпрямителя, питающего напряжением E_2 каскад, собранный на лампе $Л_3$, заземлен отрицательный полюс).

До прихода запускающего импульса лампа $Л_1$ заперта, а лампа $Л_2$ отперта. В этом положении потенциал анода отпертой лампы ниже потенциала «земли» на величину падения напряжения U_{R11}, создаваемого током покоя лампы $Л_2$ на сопротивлении R_{11}. Диод $Д_{26}$, находящийся в проводящем состоянии, образует соединительную цепь между анодом лампы $Л_2$ и управляющей сеткой разрядной лампы $Л_3$.

При отпертой лампе $Л_2$ разрядная лампа $Л_3$ заперта. Это обусловлено выбором такого соотношения между напряжением E'_3, снимаемым с движка переменного сопротивления R_{15}, и напряжением U_{R11} (рис. 3,*а* и *в*), при котором потенциал управляющей сетки лампы $Л_3$ получается ниже потенциала ее катода, т. е. «земли», на величину напряжения запирания этой лампы. За время запертого состояния лампы $Л_3$ конденсатор C_5 заряжается до напряжения анода этой лампы, определяемого потенциалом катода фиксирующего диода $Д_{1б}$.

Запускающий импульс, подаваемый на управляющую сетку лампы $Л_2$ через конденсатор C_3 и диод $Д_3$, опрокидывает триггер. Лампа $Л_2$ запирается, а лампа $Л_1$ отпирается. При этом потенциал анода лампы $Л_2$, а следовательно, и катода диода $Д_{2б}$ становится равным потенциалу «земли». Разрядная лампа $Л_3$ отпирается, и конденсатор C_5 разряжается через эту лампу и сопротивления R_{16}, R_{15} и R_{18}. Ток разряда конденсатора создает на сопротивлении R_{18} падение напряжения U_{R18}, величина и полярность которого таковы (рис. 3,*б* и *г*), что диод $Д_{2б}$ запирается и управляющая сетка лампы $Л_3$ отключается от триггера. Потенциал этой сетки ниже потенциала «земли», но выше потенциала запирания лампы.

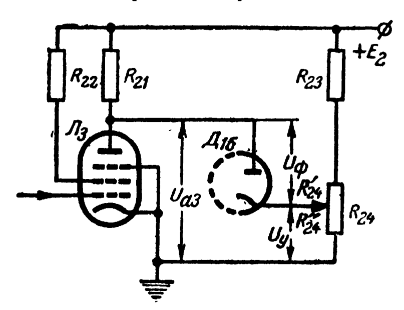


Рис. 4. Схема фиксации анодного напряжения.

По мере разряда конденсатора напряжение на аноде лампы $Л_3$ уменьшается по линейному закону. Одновременно понижается и потенциал катода диода $Д_{1а}$. Когда потенциал анода лампы $Л_3$ (катода $Д_{1а}$) становится равным потенциалу анода диода $Д_{1а}$, последний отпирается и через него на управляющую сетку открытой лампы $Л_1$ передается пилообразное напряжение, запирающее эту лампу. Триггер переключается в исходное состояние равновесия и сохраняет такое состояние до прихода следующего запускающего импульса. Лампа $Л_2$ отпирается, разряд конденсатора прекращается и начинается его подзаряд. Таким образом, фиксируется момент окончания равертки, т. е. ее длительность.

Диоды $Д_{2а}$ и $Д_{1б}$ служат для фиксации начальных напряжений на анодах ламп $Л_2$ и $Л_3$. Механизм фиксации рассмотрим на примере лампы $Л_3$. Он заключается в следующем.

Как видно из рис. 4, анод лампы подключен через диод к делителю напряжения, выполненному на сопротивлениях R_{23} и R_{24}. Когда лампа $Л_3$ заперта, через сопротивление R_{21} протекает некоторый ток, создающий падение напряжения на этом сопротивлении. Поэтому потенциал анода $U_{а3}=U_у+U_ф$. Но так как внутреннее сопротивление открытого диода мало по сравнению с сопротивлением R''_{24}, то $U_ф \ll U_у$ и $U_{а3} \approx U_у$. Таким образом, потенциал анода запертой лампы $Л_3$ равен напряжению $U_у$,

снимаемому с делителя напряжения. Это означает, что конденсатор C_5 всегда заряжается до строго фиксированного (заранее установленного) напряжения $U_у$.

Когда же лампа $Л_3$ отпирается, потенциал ее анода падает и становится меньше напряжения $U_у$. Диод $Д_{16}$ запирается, в результате чего «разрывается» цепь между анодом лампы и делителем напряжения, выполненным на сопротивлениях R_{23} и R_{24}.

Генераторы развертки, построенные на рассмотренном принципе, встречаются в осциллографах С1-8А (УО-1М), С1-12 (ДЭО-1) и др.

2. ЛИНЕЙНАЯ РАЗВЕРТКА С КАЛИБРОВОЧНЫМИ МЕТКАМИ

При измерении временны́х интервалов можно использовать линейную развертку, не калиброванную по длительности. Временной интервал определяют по числу калибровочных импульсов или меток, помещающихся на экране осциллографа между изображениями опорного и интервального импульсов, аналогично тому как измеряется длительность импульса в импульсных осциллографах, например С1-2 (25-И), С1-3 (ИО-4), С1-4 (ЭНО-1), С1-5 (СИ-1) и др.

Метки вырабатываются стабильным по частоте генератором гармонических колебаний. Иногда напряжение генератора известной частоты (периода) подают на вертикально отклоняющие пластины. В этом случае о временно́м интервале судят по числу N периодов синусоидального напряжения, разделяющих изображения опорного и интервального импульсов. Измеряемый интервал определяется соотношением

$$\Delta t = NT = \frac{N}{f}, \qquad (6)$$

где T — период, а f — частота напряжения генератора.

Чаще применяют калибровочные яркостные метки. Их получают в результате подачи синусоидального напряжения генератора меток на управляющий электрод трубки. Так как в положительные полупериоды яркость свечения увеличивается, а в отрицательные — уменьшается, линия развертки, наблюдаемая на экране, состоит из чередующихся ярких и темных меток. Расстояние между серединами двух соседних ярких или двух темных меток равно периоду T колебаний генератора. Таким образом, и в этом случае временной интервал определяется по формуле (6), где N — число меток между опорными и интервальными импульсами. Точность измерения получается до полуметки. Поэтому цену метки (период колебаний генератора) нужно выбирать так, чтобы число меток между опорным и интервальным импульсами было максимальным при хорошей различимости отдельных меток.

Колебания генератора калибровочных меток должны отвечать определенным требованиям: начинаться синхронно с появлением напряжения ждущей развертки на горизонтально откло-

няющих пластинах трубки, быть незатухающими, пока длится развертка, и быстро затухать по ее окончании (иначе генератор не будет готов к возбуждению в начале следующего цикла развертки), быть стабильными по частоте. В тех случаях, когда допустима погрешность измерения порядка нескольких процентов, указанным требованиям хорошо удовлетворяет генератор с контуром ударного возбуждения. Такие схемы и применяют в импульсных осциллографах со ждущей разверткой.

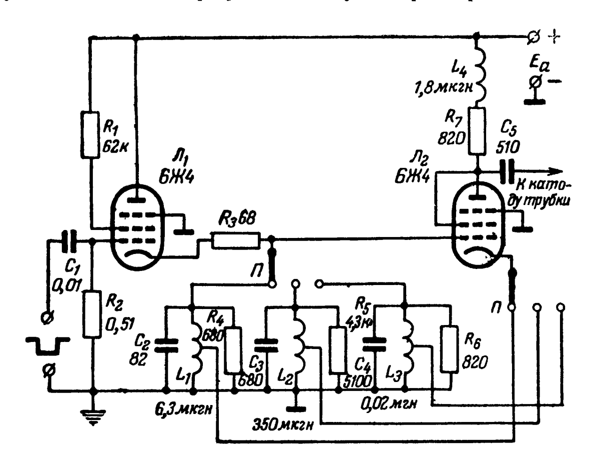


Рис. 5. Ламповый генератор калибровочных меток (0,2; 5 и 100 *мксек*).

Рассмотрим работу генератора калибровочных меток с контуром ударного возбуждения (рис. 5). В катодную цепь лампы $Л_1$ включен колебательный контур *LC*. Лампа $Л_1$ нормально отперта, через нее и катушку индуктивности течет постоянный ток. Колебания в контуре отсутствуют. В нем запасена энергия в форме энергии магнитного поля катушки. Синхронно с началом работы генератора ждущей развертки с анода отпертой лампы этого генератора подается на управляющую сетку лампы $Л_1$ отрицательный импульс, запирающий ее. Анодный ток лампы прекращается, и в контуре ударно возбуждаются колебания с частотой, определяемой параметрами элементов контура Продолжительность колебаний задается длительностью импульса, запирающего лампу $Л_1$, т. е. длительностью ждущей развертки. По окончании ждущей развертки лампа $Л_1$ отпирается. Ее внутреннее сопротивление оказывается подключенным параллельно контуру, и поскольку это сопротивление мало, колебания в контуре быстро затухают.

Лампа $Л_2$ играет роль регулятора, обеспечивающего получение незатухающих колебаний, пока длится отрицательный импульс, запирающий лампу $Л_1$, т. е. пока длится ждущая развертка. Ток лампы $Л_2$, изменяющийся в фазе с напряжением на контуре (а также с напряжением между средней точкой катуш-

ки индуктивности и «землей»), пополняет энергию колебательного контура, т. е. обеспечивает компенсацию потерь.

Синусоидальное напряжение с анода лампы $Л_2$ подается на управляющий электрод или катод электронно-лучевой трубки и модулирует электронный луч по яркости. Вследствие этого изображение исследуемого импульса, наблюдаемое на экране трубки, состоит из чередующихся ярких и темных отрезков. Расстояние между серединами ярких (темных) меток равно периоду собственных колебаний контура, включенного в катодную цепь лампы $Л_1$. Переключая с помощью переключателя $П$ контуры, можно изменять цену калибровочной метки.

Как показывает анализ, частота колебаний ω генератора с контуром ударного возбуждения определяется из формулы, справедливой при высокой добротности Q контура:

$$\omega \approx \omega_0 \left(1 - \frac{1}{8Q^2}\right), \qquad (7)$$

где $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

Нестабильность периода колебаний, вызываемая изменением добротности контура ΔQ, выражается равенством

$$\frac{\Delta T}{T} \approx -\frac{1}{4Q^2} \cdot \frac{\Delta Q}{Q}. \qquad (8)$$

Временной сдвиг момента появления калибровочных импульсов относительно момента запирания лампы определяется выражением

$$\Delta t_0 = \frac{1}{Q\omega_0}. \qquad (9)$$

3. ИЗМЕРИТЕЛЬ ВРЕМЕННЫ́Х ИНТЕРВАЛОВ С ЛИНЕЙНОЙ РАЗВЕРТКОЙ

В специальных измерителях временны́х интервалов с некалиброванной линейной разверткой предусматривают высокостабильные по частоте генераторы калибровочных сигналов, обеспечивающие хорошую точность измерения. Примером такого измерителя может служить прибор И2-5.

Из схемы этого прибора, приведенной на рис. 6, видно, что он является специфическим осциллографом со ждущей разверткой. Работа всех каналов прибора синхронизируется стабильным по частоте ($\delta f \approx 10^{-4}$) напряжением кварцевого генератора, подаваемым после усиления резонансным усилителем на входы каналов формирования выходных импульсов (импульсов запуска исследуемого устройства), горизонтальной развертки, калибровочных меток (а также на отдельное выходное гнездо). Напряжение горизонтального отклонения луча вырабатывает генератор ждущей развертки, выполненный по схеме ждущего блокинг-генератора.

Так как в приборе применяется ждущая развертка со скоростью 300—400 *мм/мксек*, для получения прямого хода луча используется крутой фронт импульса напряжения блокинг-генератора, которое подается на горизонтально отклоняющие пластины трубки через двухтактный фазоинверсный усилитель. Запуск блокинг-генератора осуществляется импульсами, формируемыми из напряжения кварцевого генератора в специальном

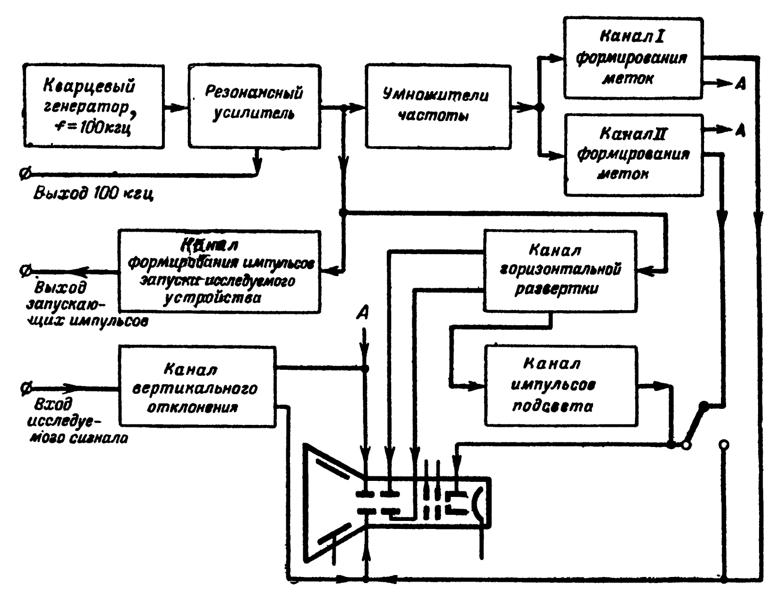


Рис. 6. Функциональная схема измерителя с линейной разверткой.

канале формирования развертки. На входе канала имеется фазовращатель, позволяющий сдвигать по фазе выходное напряжение относительно входного от 0 до 360°*n* (где *n* — число оборотов ротора фазовращателя). Этим достигаются плавная регулировка задержки горизонтальной развертки относительно начала исследуемого процесса, а также перемещение импульсов вдоль линии развертки.

При 1 обороте ротора фазовращателя фаза изменяется на 360°, что по времени соответствует 1 периоду напряжения кварцевого генератора, равному 10 *мксек*. Для плавной регулировки имеется редуктор, при вращении внешнего барабана которого изменение фазы замедляется в 30—40 раз. Напряжение выхода фазовращателя поступает через усилитель в схему деления частоты, состоящую из нескольких делителей, с помощью которых получают серию частот повторения развертки (0,5; 0,625; 1; 1,25; 1,5; 2; 2,5; 5; 10 *кгц*). Регулировка частоты повторения развертывающего напряжения достигается изменением коэффициента

деления частоты напряжения кварцевого генератора путем переключения делителей частоты.

Канал формирования импульсов подсвета развертки запускается импульсами, поступающими из канала развертки, вследствие чего подсвет синхронизируется с разверткой. Регулируя время задержки импульса подсвета, можно осуществить подсвет прямого и обратного хода луча раздельно или одновременно.

Схема формирования меток состоит из двух умножителей (×4×5×5 и ×2×5), преобразующих колебания кварцевого генератора (f_1=100 *кгц*) в колебания более высокой частоты (f_2=100 *Мгц*), и двух каналов формирования меток: ценой 0,01 и 0,5 *мксек*. В первом из этих двух каналов (0,01 *мксек*) синусоидальное напряжение частотой 100 *кгц* преобразуется путем умножения и усиления в напряжение частотой 100 *Мгц*, которое может подаваться либо на управляющий электрод трубки, либо на вертикально отклоняющие пластины. Во втором канале синусоидальные колебания преобразуются в остроконечные импульсы длительностью 0,05 *мксек* с периодом следования 0,5 *мксек*, которые поступают только на вертикально отклоняющие пластины отдельно или одновременно с метками 0,01 *мксек*.

Измерения временных интервалов могут проводиться в режиме как внутренней, так и внешней синхронизации. Различие заключается лишь в том, что в первом режиме синхронизация осуществляется напряжением внутреннего кварцевого генератора, а во втором — напряжением внешнего источника той же частоты, что и у кварцевого генератора. При внешней синхронизации точность измерения зависит от стабильности и точности частоты напряжения внешнего источника.

Временной интервал между опорным и интервальным импульсами измеряется с помощью калибровочных меток и фазовращателя. Методика измерения сводится к следующему.

После перевода переключателя рода синхронизации в соответствующее положение устанавливают требуемую для работы частоту повторения выходных импульсов. При этом автоматически обеспечивается такая же частота повторения развертки, так как оба переключателя (частоты выходных импульсов и развертки) имеют одну рукоятку управления. Выходные (запускающие) импульсы, снимаемые со специального гнезда, подводят ко входу канала вертикального отклонения. При этом переключатель входного устройства канала вертикального отклонения ставится в положение, при котором импульс попадает непосредственно на пластины (минуя усилитель). Этот импульс является опорным. Усиление и смещение по оси *X* изменяют так, чтобы начало и конец линии развертки находились в пределах экрана электронно-лучевой трубки. Регулировкой подсвета линии развертки при обратном ходе луча (в приборе имеется специальный орган, регулирующий задержку импульса подсвета) добиваются того, чтобы эта линия была видна (она ярче линии прямого хода, так как скорость обратного хода меньше).

Вращая ротор фазовращателя, изменяют фазу развертки до тех пор, пока изображение опорного импульса (его фронта) не окажется посередине экрана трубки. После этого гасят обратный ход, оставляя на экране только линию прямого хода. Регули-

ровкой фазы развертки вновь добиваются появления на экране изображения опорного импульса при прямом ходе и совмещают его фронт с определенной вертикальной линией сетки, нанесенной на экран. Назовем эту линию «опорной». Заметив опорную линию, устанавливают шкалы счетчика оборотов ротора фазовращателя на нули. Этим заканчивают предварительную регулировку и приступают непосредственно к измерениям.

Процесс измерения весьма прост. От входного гнезда канала вертикального отклонения отключают кабель, подводящий напряжение выходных (опорных) импульсов, и подключают его к исследуемому устройству, а ко входу *Y* прибора подсоединяют кабель, идущий от исследуемого устройства и подающий интервальный импульс. На выбор включают калибровочные метки ценой 0,01 *мксек* (амплитудные или яркостные) или 0,5 *мксек* (амплитудные), либо и те и другие вместе. Затем вращают ручку или барабан фазовращателя и считают число меток, которые проходят через опорную линию до тех пор, пока с нею не совпадет фронт интервального импульса. Произведение количества меток на их цену дает величину задержки интервального импульса относительно опорного, т. е. величину определяемого временнóго интервала.

Если интервальный импульс подается на пластины трубки через усилитель канала вертикального отклонения, то необходимо учесть задержку, вносимую усилителем. Для определения задержки опорный импульс сначала подают непосредственно на пластины, а затем через усилитель. Смещение изображения импульса во втором случае, измеряемое с помощью меток ценой 0,01 *мксек*, и характеризует задержку в усилителе.

Описанный прибор применяется для измерения интервалов, разделяющих повторяющиеся пары импульсов.

4. КРУГОВАЯ РАЗВЕРТКА

Применение круговой развертки позволяет получить при одной и той же трубке более высокую точность измерений по сравнению с линейной разверткой. При круговой развертке луч движется по окружности. Так как длина окружности в π раз больше диаметра, то при одном и том же временнóм интервале геометрическое расстояние между изображениями опорного и интервального импульсов на окружности получается значительно больше (рис. 7,*а*), чем на прямой. Вследствие этого увеличивается разрешающая способность прибора и, следовательно, его точность.

Для получения круговой развертки (рис. 7,*б*) необходимо подать одновременно на входы *X* и *Y* осциллографа два синусоидальных напряжения одной и той же частоты, сдвинутых по фазе на 90° (рис. 7,*в*). Амплитуды этих напряжений и усиления каналов *X* и *Y* осциллографа выбирают так, чтобы отклонения луча по горизонтали и вертикали были одинаковыми. Тогда луч будет двигаться по окружности, совершая 1 оборот за время, равное периоду *T* синусоидального развертывающего напряжения.

Рассмотрим метод измерения временны́х интервалов, использующий круговую развертку с модуляцией яркости. С помощью фазорасщепителя (рис. 8,*а*) синусоидальное напряжение генера-

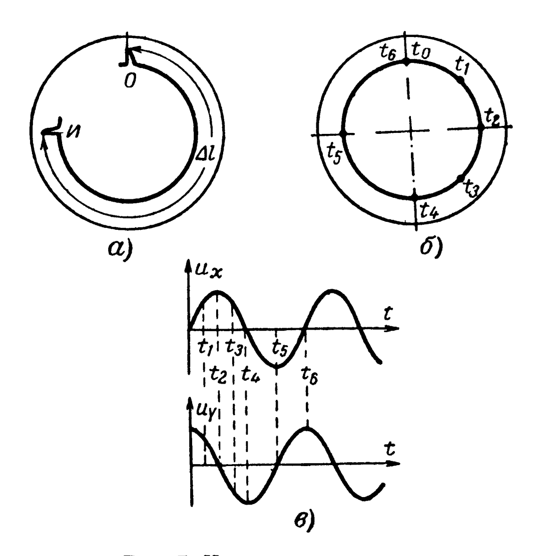


Рис. 7. Круговая развертка.

а — изображения опорного и интервального импульсов на развертке; *б* и *в* — принцип получения круговой развертки.

тора преобразуется в два напряжения, сдвинутые по фазе на 90°. Эти напряжения подводятся ко входам *X* и *Y* осциллографа и при соответствующей регулировке усилений каналов *X* и *Y* создают круговую развертку луча. После получения изображения окружности яркость уменьшают настолько, чтобы след движения луча был еле заметен.

Опорный и интервальный импульсы подаются на управляющий электрод электронно-лучевой трубки, т. е. на вход канала *Z*.

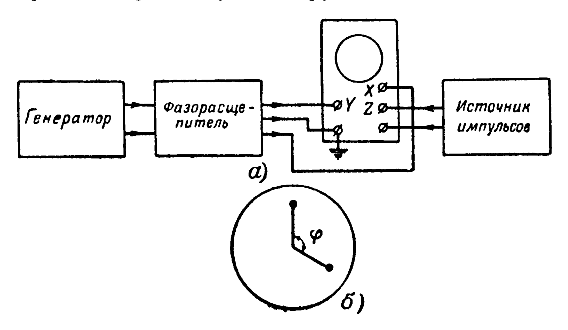


Рис. 8. Измерение интервала методом круговой развертки с модуляцией яркости.

а — схема измерения; *б* — изображение на экране трубки.

В моменты их появления на управляющем электроде яркость свечения повышается и на экране получается изображение двух светящихся точек (рис. 8,*б*). За 1 период T синусоидального напряжения луч описывает полную окружность (360°), а за измеряемый интервал Δt он перемещается по окружности на угол φ.

Измерив угол φ между светящимися точками с помощью специальной шкалы, можно определить временной интервал по формуле

$$\Delta t = \frac{T}{360} \varphi^{\circ}. \tag{10}$$

Для того чтобы изображения светящихся точек не перемещались по окружности, необходимо синхронизировать начало работы генератора круговой развертки с моментом подачи опорного импульса на управляющий электрод. Если угол φ получается малым, то для повышения точности нужно увеличить частоту (уменьшить период) напряжения круговой развертки.

В случае, когда имеется возможность изменять частоту в широких пределах, можно установить такое значение частоты, при котором светящаяся точка интервального импульса «догонит» точку опорного импульса и совпадет с нею. При этом

$$\varphi^{\circ}=360 \text{ и } \Delta t=T,$$

т. е. измеряемый временной интервал равен периоду напряжения круговой развертки. Можно добиться слияния светящихся точек и при частоте, в k раз более высокой (k=2, 3, 4 ... — целые числа), что повышает в k раз точность измерений. Однако следует иметь в виду, что устойчивая картина будет наблюдаться лишь в случае высокой стабильности как частоты развертывающего напряжения, так и измеряемого временно́го интервала.

5. СПИРАЛЬНАЯ РАЗВЕРТКА

Если на обе пары отклоняющих пластин трубки подавать синусоидальные напряжения, сдвинутые по фазе на 90° и обеспечивающие одинаковые отклонения луча по обеим осям, амплитуды которых изменяются во времени по линейному закону, то луч будет описывать архимедову спираль (рис. 9). Такая развертка называется спиральной. Она может быть образована, например, напряжением, полученным путем модуляции пилообразным сигналом двух синусоидальных напряжений. При этом луч будет двигаться по одной и той же спирали в каждый период пилообразного напряжения, если период $T_{п}$ модулирующего напряжения будет кратен периоду $T_{син}$ синусоидального напряжения, т. е. при выполнении условия $T_{п}=nT_{син}$ (где n — целое число).

Существуют различные способы измерения временны́х интервалов при использовании спиральной развертки. В приборах с обычной трубкой применяют модуляцию яркости. Так же как и в случае круговой развертки, получают две светящиеся точки,

соответствующие опорному и интервальному импульсам (рис. 9,*б*). При спиральной развертке разрешающая способность и, следовательно, точность получаются в m раз выше, чем при круговой (m — разность номеров витков спирали, на которых расположены светящиеся точки). Если длина окружности всего в π раз больше диаметра, то длина спирали может быть сделана значительно больше длины окружности, т. е. величина m может быть достаточно большой.

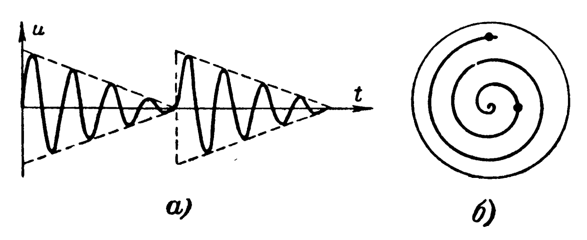


Рис. 9. Спиральная развертка.

Рассмотрим функциональную схему устройства, создающего спиральную развертку (рис. 10). Напряжение кварцевого генератора преобразуют с помощью балансного модулятора с фазорасщепителем, а также усилителей каналов *X* и *Y* в два напряжения, обеспечивающие круговую развертку луча.

До прихода опорного импульса луч запирают постоянным отрицательным смещением на управляющем электроде. Опорный импульс *О* запускает одновибратор *I*, выходной положительный импульс которого одновременно поступает на управляющий электрод трубки, отпирая луч, и на интегратор, преобразующий прямоугольный импульс в пилообразный. Последним модулируется синусоидальное напряжение и в результате получается спиральная развертка. Интервальный импульс *И* запускает второй одновибратор. Выходной положительный импульс одновибратора *II* подается на катод трубки и запирает луч. Таким образом, на

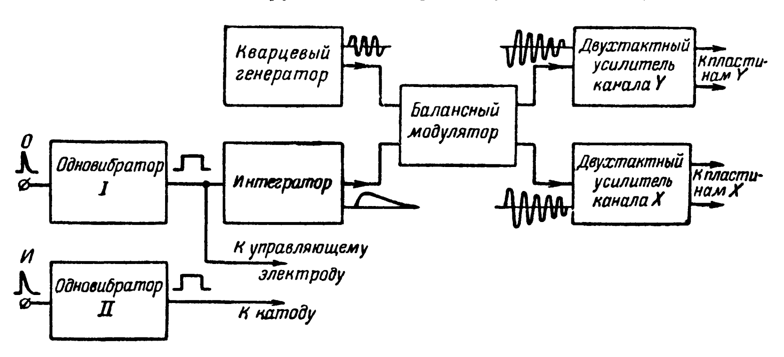


Рис. 10. Схема получения спиральной развертки.

экране наблюдается часть спирали. Число полных витков и часть неполного витка определяют измеряемый интервал. Для повышения точности отсчета на спираль наносятся метки времени в виде импульсов (выбросов) небольшой амплитуды, направленных по радиусу. Период следования этих импульсов известен и является калиброванной величиной.

В некоторых измерителях временны́х интервалов применяют специальные осциллографические трубки с коническим электродом для радиального отклонения луча. Спиральную развертку

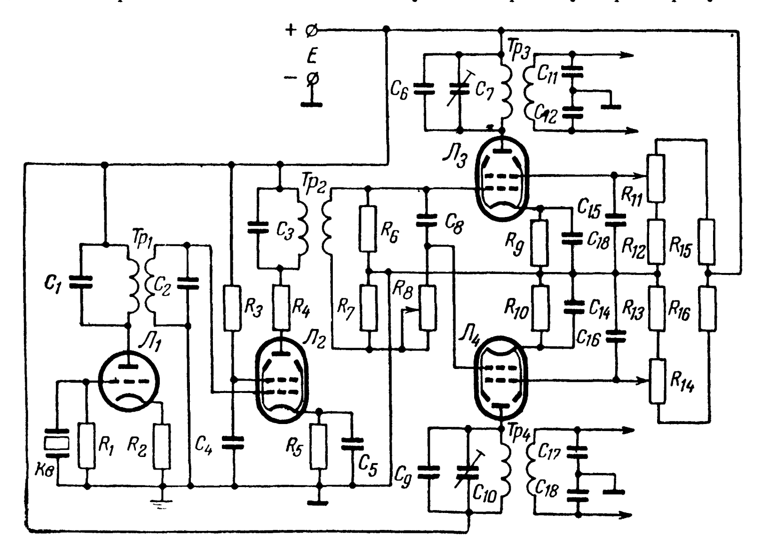


Рис. 11. Схема генератора круговой развертки.

в таких случаях часто получают следующим образом. На обе пары отклоняющих пластин подают напряжения, необходимые для создания круговой развертки. Амплитуды их выбирают так, чтобы луч описывал окружность по периферии трубки. Одновременно на конический электрод трубки подается линейно убывающее напряжение от специального генератора, которое вызывает движение луча по радиусу от периферии экрана к его центру. Таким образом, луч, совершая одновременно два движения (по окружности и по радиусу), описывает архимедову спираль.

Трубка с радиальным отклонением луча имеет сравнительно низкую чувствительность, так как конический электрод расположен близко к экрану. Поэтому при работе с такой трубкой необходимо, чтобы опорный и интервальный импульсы имели большую амплитуду. Это является недостатком трубки. Другой ее недостаток заключается в нелинейной зависимости радиального отклонения от величины отклоняющего напряжения, что объясняется характером поля, создаваемого радиальной откло-

няющей системой. Это обстоятельство, если не приняты специальные меры, обусловливает неравномерный шаг спирали (неодинаковые расстояния между витками).

На рис. 11 и 12 приведены схемы генераторов круговой и радиальной разверток, в результате комбинации которых создается спиральная развертка в электронно-лучевой трубке с коническим электродом. Генератор круговой развертки (рис. 11) состоит из трех основных узлов: кварцевого генератора, фазорасщепителя и двухтактного усилителя. Задающий кварцевый генератор выполнен на лампе $Л_1$. Вырабатываемое им напряжение частотой 100 *кгц* усиливается резонансным усилителем, собранным на лампе $Л_2$, и поступает на фазовращатель, состоящий из сопротивлений R_6, R_7 и R_8 и конденсатора C_8. Часть входного напряжения и выходное напряжение фазовращателя, сдвинутые по фазе на 90° (точная величина сдвига корректируется переменным сопротивлением R_8), поступают на входы двухтактного усилителя, выполненного на лампах $Л_3$ и $Л_4$. С одного выхода усилителя напряжение подается на горизонтально отклоняющие, а со второго — на вертикально отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки. Передача симметричных напряжений осуществляется с помощью трансформаторов $Тр_3$ и $Тр_4$.

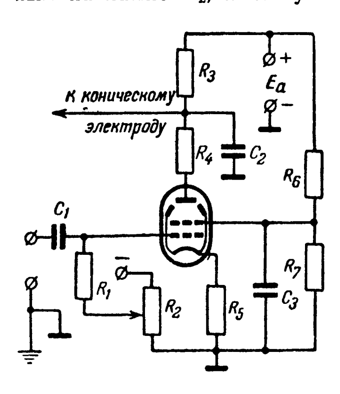


Рис. 12. Схема генератора радиальной развертки.

Генератор радиальной развертки (рис. 12) вырабатывает линейно убывающее напряжение, подаваемое на конический электрод электронно-лучевой трубки для радиального перемещения луча от периферии к центру. Такое перемещение луча в сочетании с движением по окружности, создаваемым генератором круговой развертки, образует спиральную развертку. Шаг спирали определяется скоростью изменения напряжения радиальной развертки.

В исходном состоянии лампа заперта отрицательным напряжением, подаваемым на ее управляющую сетку с движка потенциометра R_2. За время запертого состояния лампы конденсатор C_2 заряжается по цепи плюс источника $E_а$ — сопротивление R_3 — конденсатор C_2 — минус источника («земля»). Когда на управляющую сетку лампы поступает положительный импульс, лампа отпирается и конденсатор C_2 разряжается через нее, а также сопротивления R_4 и R_5. Так как разряд происходит через тетрод, анодный ток которого практически мало зависит от величины анодного напряжения (при работе на пологом участке анодной характеристики), напряжение на конденсаторе уменьшается по закону, близкому к линейному. Продолжительность разряда конденсатора и, следовательно, действия радиальной развертки определяются длительностью положительного

импульса, подаваемого на управляющую сетку лампы тетрода. По окончании этого импульса лампа запирается, разряд конденсатора прекращается и начинается его подзаряд через сопротивление R_3.

6. ИЗМЕРИТЕЛЬ ВРЕМЕННЫХ ИНТЕРВАЛОВ СО СПИРАЛЬНОЙ РАЗВЕРТКОЙ

Примером измерителя временных интервалов со спиральной разверткой может служить осциллографический измеритель типа И2-3 (рис. 13), применяемый для измерения временных интерва-

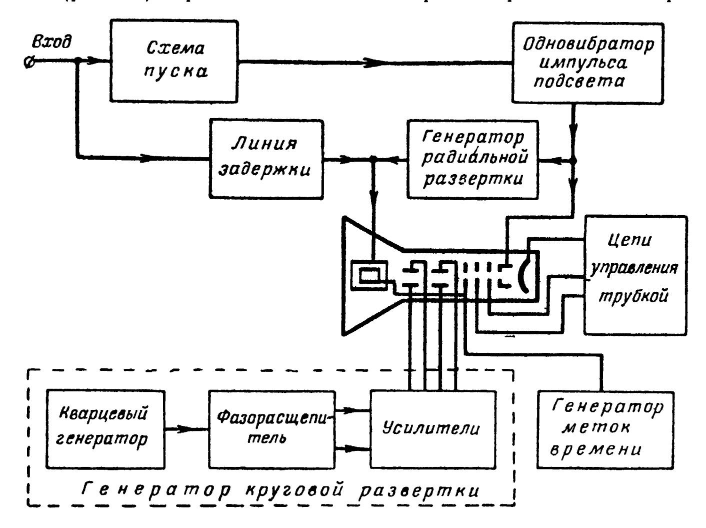


Рис. 13. Функциональная схема измерителя со спиральной разверткой.

лов между неповторяющимися импульсами. В измерителе применена осциллографическая трубка типа 23ЛО51А с коническим электродом для радиального отклонения луча.

Принцип действия прибора заключается в следующем. Синусоидальное напряжение частот $f=100$ *кгц*, вырабатываемое кварцевым генератором, после усиления подается на фазорасщепитель. С выхода фазорасщепителя два напряжения, сдвинутые на 90°, поступают на входы усилителей X и Y каналов осциллографа. Коэффициенты усиления последних отрегулированы так, что получается круговая развертка луча по периферии экрана трубки, причем одну полную окружность луч прочерчивает за $1/f$ *сек*, т. е. 10 *мксек*.

До прихода опорного импульса изображение на экране отсутствует, так как трубка заперта постоянным отрицательным смещением, поданным на ее управляющий электрод. С появле-

нием на входе прибора опорного импульса зажигается пусковой тиратрон (схема пуска), от которого срабатывает одновибратор импульса подсвета трубки. Сформированный одновибратором импульс одновременно с отпиранием трубки запускает генератор радиальной развертки, вырабатывающий линейно убывающее напряжение. Последнее подается на конический электрод трубки и вызывает напряжение луча от периферии трубки к ее центру, в результате чего получается спиральная развертка.

Опорный импульс через линию задержки поступает на конический электрод, вызывая радиальное отклонение луча. К моменту подачи на вход прибора интервального импульса, запаздывающего по отношению к опорному на измеряемый промежуток времени Δt, луч успевает пройти некоторую часть спирали. По количеству полных витков и части неполного витка, разделяющих импульсы, можно определить временной интервал.

Для повышения точности и удобства измерения на спираль наносятся метки времени. Они создаются специальным генератором меток с кварцевой стабилизацией и представляют собой короткие импульсы небольшой амплитуды, следующие с определенным интервалом (0,2 *мксек*). Импульсы подаются в цепь второго анода трубки, соединенного с внутренним коническим электродом, и вызывают небольшое отклонение луча в радиальном направлении. Частота меток выбрана кратной частоте круговой развертки. Вследствие этого метки разбивают окружность на целое число частей и располагаются по радиусу, так что они выделяются на фоне исследуемых сигналов.

ГЛАВА ВТОРАЯ

МЕТОД ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ВРЕМЕННО́ГО ИНТЕРВАЛА В ЧИСЛО ИМПУЛЬСОВ

В современной радиоэлектронике используются непрерывные и дискретные сигналы. Преобразование непрерывных величин, иначе называемых аналоговыми, в дискретные является основой для построения измерительных приборов с цифровым отсчетом. Сущность преобразования временно́го интервала Δt, представляющего собой непрерывную величину, в дискретную форму заключается в преобразовании его в число импульсов, однозначно соответствующее величине Δt. Это число фиксируется счетчиком, снабженным системой цифрового отсчета. Поэтому метод преобразования временно́го интервала в число импульсов называют также методом дискретного счета. Схемы преобразования весьма многообразны, но в большинстве из них встречаются аналогичные типовые устройства: триггеры, временны́е селекторы, сравнивающие устройства, генераторы пилообразного напряжения, счетчики импульсов и др.

В связи с этим сначала мы рассмотрим типовые элементы, применяемые в схемах преобразования и счета, а затем уже перейдем к изложению сущности метода.

7. ТРИГГЕРЫ

Триггер представляет собой электронное устройство, обладающее двумя состояниями устойчивого равновесия. Триггеры весьма многообразны. Они могут быть выполнены на электронных лампах, тиратронах, транзисторах, туннельных диодах, магнитных элементах.

Триггеры имеют два выхода. Если схема выполнена на лампах, то выходами служат аноды двух ламп. Вход триггера определяется неоднозначно и зависит от способа подачи сигналов запуска. В ламповом триггере входами чаще всего служат сетки ламп; при этом триггер имеет два входа. Возможен случай, когда у триггера только один вход: сигнал, переключающий триггер, подается на обе сетки сразу. Такой вход называют счетным.

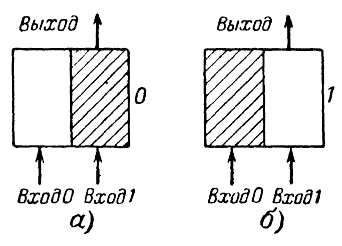


Рис. 14. Условные изображения триггеров.

Независимо от вида конкретной схемы триггер удобно изображать в виде прямоугольника, разделенного на две части, соответствующие двум ветвям схемы. Часть (половина) прямоугольника, через которую в данном состоянии триггера протекает ток, условно штрихуется (рис. 14).

Условимся обозначать два возможных состояния устойчивого равновесия триггера цифрами *0* и *1*. Цифра *0* соответствует состоянию, при котором на выходе триггера создается низкий по абсолютной величине потенциал (рис. 14,*а*). Противоположному состоянию (когда на выходе высокий потенциал) соответствует цифра *1* (рис. 14,*б*).

Ламповые триггеры. Две принципиальные схемы симметричного лампового триггера приведены на рис. 15. Импульсы запуска можно подавать на сетку одного из триодов: положитель-

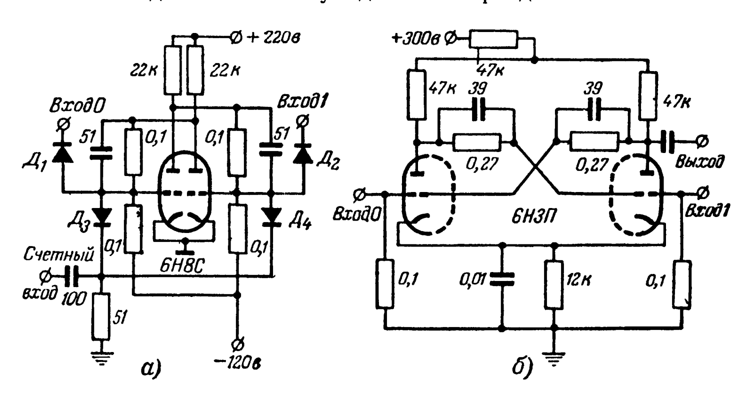


Рис. 15. Ламповые триггеры.

ные — на сетку запертого или отрицательные — на сетку отпертого триода. Другим вариантом является подача запускающих импульсов отрицательной полярности одновременно на сетки обоих триодов (на счетный вход). В некоторых случаях импульсы подают на катоды триодов или на аноды их через разделительные диоды.

Способ подачи импульсов запуска на сетку (или анод) одного из триодов оказывается удобным, когда следующие друг за другом импульсы имеют чередующиеся полярности и переключение триггера должно происходить при подаче каждого импульса. Такой вариант переключения триггера используется

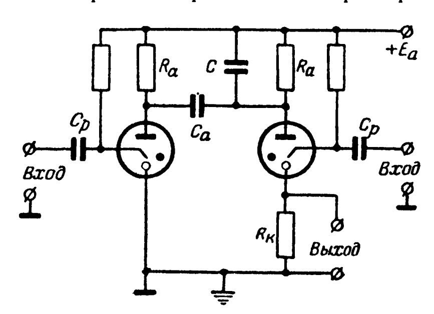


Рис. 16. Схема триггера на тиратронах с холодным катодом.

в приборе, измеряющем временной интервал, задаваемый опорным и интервальным импульсами, поступающими от различных источников.

В электронных вычислительных устройствах, счетчиках числа импульсов и других приборах широко используются триггеры, переключение которых осуществляется в результате поступления однополярных отрицательных импульсов на счетный вход. В этом случае каждый новый импульс запуска вызывает очередное переключение триггера.

На рис. 15,*а* показана типовая триггерная ячейка с внешним источником сеточного смещения, применяемая в счетных схемах. Часто используются и триггеры с автоматическим смещением (рис. 15,*б*). Сравнивая обе схемы, к достоинствам первой следует отнести малую зависимость напряжения на сетках отпертых триодов от параметров триода. Кроме того, эта схема состоит из меньшего количества деталей, чем схема с автоматическим смещением. Последняя же обладает тем преимуществом, что позволяет обойтись без дополнительного источника сеточного смещения: отрицательное смещение на сетки ламп снимается с сопротивления (12 *ком*), включенного в общую катодную цепь ламп. Если схема триггера симметрична, то сумма анодных токов обоих триодов остается все время практически постоянной и напряжение отрицательного смещения не изменяется.

Важным достоинством схемы триггера с автоматическим смещением по сравнению со схемой с отдельным источником

является ее малая чувствительность к изменению питающих напряжений. Кроме того, эта схема позволяет подавать управляющие импульсы на катоды ламп, чем достигается развязка от источника управляющих сигналов и повышается чувствительность триггера к импульсам положительной полярности.

Триггеры на тиратронах с холодным катодом. На рис. 16 показана схема триггера с общей емкостью между анодами двух тиратронов. Работа такого триггера заключается в следующем.

Предположим, что триггер находится в состоянии равновесия, при котором левый (по схеме) тиратрон погашен, а правый горит. Для переключения триггера необходимо подать на пусковой электрод левого тиратрона положительный импульс, амплитуда которого достаточна для зажигания тиратрона. При зажигании напряжение анода левого тиратрона падает и на анод правого тиратрона через конденсатор $C_а$ поступает отрицательный импульс, который гасит этот тиратрон. Триггер переходит во второе устойчивое положение. Новое переключение триггера возможно при подаче положительного импульса на пусковой электрод погашенного тиратрона.

Выходное напряжение снимается с небольшого сопротивления $R_к$, включенного в цепь катода правого тиратрона. Поэтому на выходе триггера появляется напряжение лишь тогда, когда правый тиратрон отперт (горит). При запирании тиратрона оно падает до нуля.

Для увеличения амплитуды выходного импульса параллельно анодному сопротивлению $R_а$ тиратрона включен конденсатор C, который шунтирует сопротивление в момент зажигания тиратрона. В этот момент амплитуда выходного импульса определяется соотношением

$$U_{вых} = E_а \frac{R_к}{R_к + R_о}, \tag{11}$$

где $E_а$ — напряжение питания;

$R_о$ — сопротивление отпертого тиратрона.

После зажигания тиратрона начинаются процессы заряда конденсатора C и перезаряда конденсатора $C_а$. Когда эти процессы завершаются, амплитуда импульса, снимаемого с сопротивления $R_к$, уменьшается до величины

$$U'_{вых} = E_а \frac{R_к}{R_а + R_о + R_к}. \tag{12}$$

Такой триггер позволяет получать выходные импульсы с крутизной фронта 1—3 *мксек*. Снижение разрешающего времени триггера ограничивается временем деионизации тиратрона и постоянной времени перезаряда конденсатора $C_а$, которая приближенно может быть определена по формуле

$$\tau_а = C_а \left(R_а + \frac{R_а R_о}{R_а + R_о} \right). \tag{13}$$

Следует иметь в виду, что уменьшение емкости конденсатора $C_а$ влечет за собой уменьшение амплитуды и длительности гасящего импульса, передаваемого с анода запертого тиратрона

на анод отпертого. Если длительность этого импульса окажется меньше времени деионизации тиратрона, то последний не погаснет и оба тиратрона будут находиться в проводящем состоянии. Нельзя выбирать ниже определенной величины и сопротивление $R_а$, так как ток, протекающий через тиратрон, может оказаться выше тока гашения и тиратрон не погаснет.

Триггеры на транзисторах. Наибольшее практическое применение получили триггеры на двух плоскостных транзисторах. Их

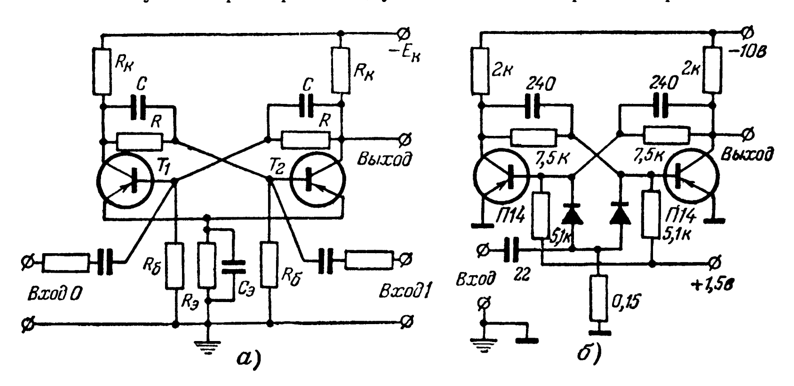


Рис. 17. Триггеры на транзисторах.

схемы и принцип работы аналогичны триггерам на электронных лампах.

На рис. 17, *а* изображена схема триггера на транзисторах с автоматическим смещением. Устойчивое состояние такой схемы, так же как и ламповой, характеризуется тем, что если один транзистор отперт, то другой заперт. Переброс триггера достигается подачей положительного импульса на базу отпертого транзистора.

Пусть схема находится в состоянии *0* (правый транзистор отперт). Подадим на вход *1* положительный импульс, запирающий транзистор T_2. Потенциал коллектора этого транзистора понизится. Отрицательный перепад коллекторного напряжения передастся на базу транзистора T_1. Это приведет к увеличению коллекторного тока транзистора T_1 и повышению потенциала его коллектора. Образующийся положительный перепад передается на базу транзистора T_2, что будет поддерживать транзистор в запертом состоянии. Чтобы вновь перебросить триггер, нужно подать положительный импульс на вход *0*.

На рис. 17, *б* приведена схема триггера на транзисторах с внешним источником питания и счетным входом. Схемы, аналогичные показанным на рис. 17, могут быть выполнены как на транзисторах с проводимостью типа *p-n-p*, так и на транзисторах с проводимостью типа *n-p-n*.

Для нормальной работы триггера необходимо соблюдать определенные соотношения между величинами элементов схемы. Сопротивления коллекторной нагрузки $R_к$ должны быть су-

щественно меньше сопротивлений коллекторно-базовых связей R. При выборе их придерживаются соотношения $R \geqslant (4 \div 5) R_к$. Сопротивления в цепи базы $R_б$ и коллекторно-базовых связей R должны быть значительно меньше обратного сопротивления эмиттер—база запертого транзистора. Параметры элементов цепочки автоматического смещения $R_эC_э$ выбирают из такого расчета, чтобы ее постоянная времени $\tau_э = R_эC_э$ намного превышала продолжительность переходных процессов триггера.

Емкости коллекторно-базовых конденсаторов C необходимо иметь такие, чтобы напряжения на них практически сохранялись неизменными, пока длится процесс переключения. В то же время эти конденсаторы должны успевать перезаряжаться в интервале между двумя соседними переключениями триггера. Последнее условие обеспечивается при выполнении соотношения

$$(4 \div 5)\, C \frac{RR_б}{R + R_б} \leqslant \frac{1}{F_{макс}} = T_р, \qquad (14)$$

где $F_{макс}$ — максимальная частота переключений триггера;

$T_р$ — разрешающее время триггера.

Работа транзистора в схеме триггера, как и в других ключевых схемах, заключается в переходах от запертого состояния к режиму насыщения в отпертом положении и затем от режима насыщения к запертому состоянию. Режим насыщения наступает при некотором значении тока базы, когда количество неосновных носителей заряда, инъектированных из эмиттера в базу (дырок в случае *p-n-p*-транзистора), превосходит количество носителей того же знака, проходящих в коллектор. В этом случае ток коллектора не зависит от тока базы, т. е. управляющее действие базы теряется. Величина коллекторного тока ограничивается сопротивлением нагрузки $R_к$, включенным в цепь коллектора. Таким образом, в области базы накапливается большое количество неосновных носителей, т. е наступает режим насыщения. Если частота переключений триггера сравнительно невелика, то состояние насыщения не является помехой для нормальной работы.

При построении схем для измерения малых временных интервалов и счетчиков импульсов с высокой скоростью счета необходимы триггеры с малым разрешающим временем. Принципиально минимальная продолжительность переключения транзистора характеризуется величиной порядка $1/f_{пр}$, где $f_{пр}$ — предельная частота эффективного усиления транзистора, достигающая, например, у транзистора П403 значения 120 *Мгц*. Однако время переключения триггера значительно больше, так как в триггере транзистор работает в режиме насыщения и после прихода импульса запуска остается в состоянии насыщения еще в течение заметного промежутка времени. Эта задержка времени перехода транзистора из отпертого состояния в запертое обусловлена рассасыванием неосновных носителей заряда, скопившихся в базе насыщенного транзистора.

Устранение насыщения достигается в схемах, получивших название ненасыщенных триггеров. На рис. 18, *а* приведена схема одного из вариантов ненасыщенного триггера, которая отли-

чается от обычной схемы наличием двух диодов *Д* и дополнительного источника напряжения $E_с$. Диоды служат фиксаторами уровня.

Как видно из рис. 18,*б*, если выполняется неравенство $|E_с|<|E_к|$, то при запертом транзисторе заперт и диод. Последний остается в запертом состоянии и после отпирания транзистора, пока напряжение на коллекторе $U_к$ ниже напряжения $-E_с$. Когда же напряжение $U_к$ повысится настолько, что оно станет выше $-E_с$, диод отопрется и начнет выполнять функции фикса-

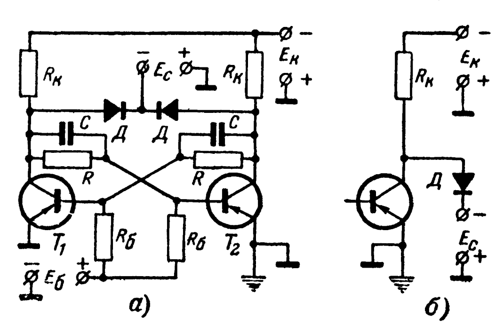


Рис. 18. Ненасыщенный триггер.

тора уровня, т. е. будет поддерживать напряжение коллектора равным $-E_с$. Величина напряжения $E_с$ выбирается такой, чтобы транзистор находился в режиме, близком к насыщению. Накопление неосновных носителей заряда в области базы не имеет места, так как они замыкаются через отпертый диод, представляющий собой малое сопротивление. При увеличении тока эммитера увеличивается ток в цепи фиксирующего диода, а ток через нагрузочное сопротивление практически сохраняется неизменным.

Для быстродействующих триггеров необходимо применять диоды, пригодные для работы в ключевом режиме. В этом отношении они характеризуются двумя основными параметрами: продолжительностью установления прямого сопротивления при насыщении и временем восстановления полной величины обратного сопротивления при запирании.

Первый параметр определяет быстродействие диода при его отпирании. У высокочастотных диодов продолжительность установления прямого сопротивления при насыщении составляет 0,01—0,1 *мксек*.

Второй параметр определяет быстродействие диода при его запирании. Время восстановления может оказаться значительным, так как после подачи на диод обратного напряжения носители зарядов рассасываются не сразу. Это время обычно существенно больше времени установления прямого сопротивления. Для его уменьшения в цепях диодов необходимо применять сопротивления малой величины.

Триггеры на туннельных диодах. Основное свойство туннельного диода — наличие падающего участка в вольт-амперной характеристике (рис. 19) — позволяет строить на этих полупроводниковых приборах быстродействующие триггеры. Рассмотрим схему триггера с одним туннельным диодом (рис. 19, *а*).

Сопротивление нагрузки R и напряжение питания E туннельного диода $Д$ выбраны такими, что нагрузочная прямая пересекает вольт-амперную характеристику диода в трех точках: *0*, *А* и *1* (рис. 19, б). Точки *0* и *1* соответствуют устойчивым состояниям равновесия, а точка *А* — неустойчивому состоянию.

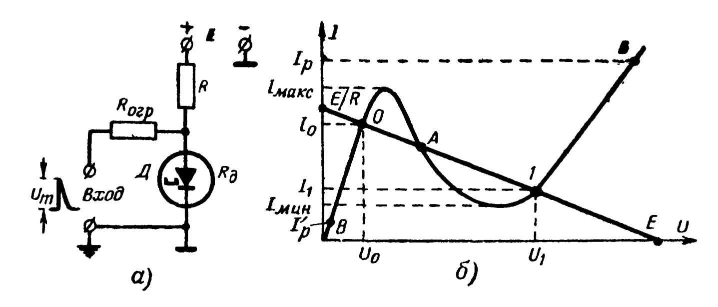


Рис. 19. Триггер на туннельном диоде.

Пусть триггер находится в положении равновесия *0*. Это положение характеризуется напряжением U_0 и током I_0. Для переключения триггера в положение *1* нужно подать на его вход запускающий положительный импульс такой амплитуды U_m, чтобы результирующий ток через диод $I_р = I_0 + \frac{U_m}{R_{огр}}$ (при $R_{огр} \gg R_д$) стал больше тока $I_{макс}$. Току $I_р$ соответствует точка *Б*. По окончании действия запускающего импульса ток $I_р$ уменьшится до значения I_1 и состояние равновесия триггера определится точкой *1*.

Новое переключение триггера (из положения *1* в положение *0*) производится импульсом запуска отрицательной полярности. Амплитуда U'_m этого импульса должна быть такой, чтобы выполнялось соотношение $I'_р = I_1 - \frac{U'_m}{R_{огр}} < I_{мин}$, т. е. чтобы результирующий ток $I'_р$ был меньше тока $I_{мин}$. При этих условиях ток скачком изменится от значения I_1 до значения $I'_р$ (точка *В*) и, когда прекратится действие запускающего импульса, примет значение I_0. Таким образом, этот триггер перебрасывается чередующимися импульсами противоположных полярностей.

Триггеры с одним туннельным диодом используются редко, так как их работа не отличается высокой надежностью. В измерительных схемах, особенно счетных, преобладают триггеры, выполняемые на двух диодах. Такие триггеры можно перебра-

сывать однополярными импульсами. Рассмотрим принцип действия двухдиодного триггера с индуктивной связью (рис. 20).

Напряжение источника питания E и сопротивления R_2 и R_3 выбраны такими, чтобы общее напряжение U на диодах $Д_1$ и $Д_2$ (рис. 20, *а* и *б*) определялось соотношением $U=U_0+U_1$, где U_0— напряжение, соответствующее состоянию *0* (точка *0* на рис. 19,*б*), а U_1 — напряжение, соответствующее состоянию *1* (точка *1* на рис. 19,*б*). При этом ток одного из диодов равен I_0, а ток другого диода I_1 (будем считать, что диоды имеют идентичные вольт-амперные характеристики) Через индуктивность L протекает ток $I_L=I_0—I_1$. В статическом режиме $I_L=\text{const}$. Так как омическое сопротивление R_L катушки индуктивности очень мало, падение напряжения $U_L=I_LR_L$ весьма близко к нулю.

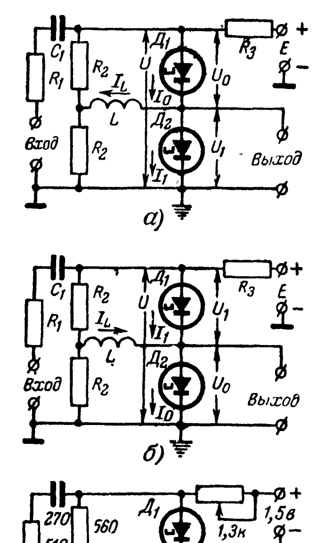


Рис. 20. Триггеры на двух туннельных диодах.

Предположим, что триггер находится в состоянии *1* (рис. 20,*а*). Для переключения его в состояние *0* на вход подается положительный импульс. Амплитуда импульса U_m должна быть такой, чтобы при суммарном напряжении U_0+U_m ток диода $Д_1$ был больше тока $I_{макс}$. После того как ток диода $Д_1$ пройдет максимум, он скачком уменьшается, стремясь к значению тока I_1. Напряжение на этом диоде стремится к величине U_1. Разностный ток I_L сначала остается неизменным, так как ток через индуктивность не может изменяться скачком, но далее, по мере уменьшения тока диода $Д_1$, уменьшается и ток через индуктивность. Когда ток диода $Д_1$ приближается к величине I_1, ток через индуктивность становится близким к нулю. При этом в катушке возникает э. д. с. самоиндукции e_L одного с током направления. В результате действия э. д с. самоиндукции после окончания запускающего импульса напряжение на диоде $Д_2$ уменьшается до величины U_0, а ток возрастает до значения I_0. Триггер переключается в состояние *0*.

Новый положительный импульс запуска вызывает переключение триггера в исходное положение, только процессы, относившиеся в предыдущем случае к диоду $Д_1$, будут теперь происходить в диоде $Д_2$, и наоборот (рис. 20, *б*).

Триггеры на туннельных диодах отличаются высоким быстродействием. В зарубежной литературе описаны схемы, позволяющие получить время переброса менее 10 *нсек*.

На рис. 20, *в* изображена триггерная ячейка счетчика на туннельных диодах.

Поясним, каким образом выбраны ее параметры.

Диоды $Д_1$ и $Д_2$ имеют одинаковые вольт-амперные характеристики (разброс не превышает ±3—5%). По ним выбраны токи $I_0=1$ *ма* и $I_1=0{,}36$ *ма*. Этим токам соответствуют напряжения $U_0=40$ *мв* и $U_1=400$ *мв*.

Ток через индуктивность

$$I_L=I_0-I_1=0{,}64 \text{ ма}.$$

Если схема находится в положении *0*, то ток через верхнее (по схеме) сопротивление R_2

$$I_R=\frac{U_1}{R_2}=\frac{0{,}4}{R_2} \text{ в/ом},$$

а ток через нижнее сопротивление R_2

$$I'_R=\frac{U_0}{R_2}=\frac{0{,}04}{R_2} \text{ в/ом}.$$

Так как $I_R-I'_R=I_L$, то

$$\frac{0{,}4}{R_2}-\frac{0{,}04}{R_2}=0{,}64 \text{ ма}$$

и, следовательно,

$$R_2=\frac{0{,}36}{0{,}64\cdot 10^{-3}}=560 \text{ ом}.$$

Суммарное напряжение

$$U=U_0+U_1=0{,}44 \text{ в}.$$

Ток через сопротивление R_3

$$I_{общ}=I_R+I_1\approx 1{,}07 \text{ ма}.$$

Поскольку $U=E-I_{общ}R_3$,

$$R_3=\frac{E-U}{I_{общ}}=\frac{E-0{,}44}{1{,}07\cdot 10^{-3}}.$$

При $E=1{,}5$ *в* сопротивление $R_3\approx 1$ *ком*.

8. ВРЕМЕННЫ́Е СЕЛЕКТОРЫ

Временной селектор представляет собой устройство с двумя входами и одним выходом. Напряжение на выходе такого устройства появляется только в течение времени совместного действия напряжений на обоих входах.

Широко распространен временной селектор, выполненный на пентоде (рис. 21, *а*). Последний запирается по управляющей и защитной сеткам, которые служат входами селектора. Выход-

ное напряжение снимается с анода лампы. Если подать положительный импульс только на первую или третью сетку, то пентод останется в запертом состоянии и напряжение на его аноде не изменится. Когда же положительные импульсы поступают на обе сетки сразу, то пентод отпирается на время совместного действия импульсов. С анода лампы снимается отрицательный импульс.

В качестве примера временнóго селектора на транзисторах рассмотрим схему, приведенную на рис. 21, *б*. В этой схеме два

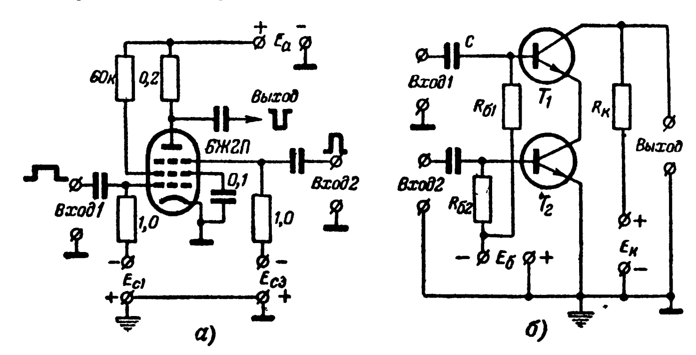


Рис. 21. Примеры временны́х селекторов.

транзистора включены последовательно. Оба транзистора заперты напряжением смещения $E_б$. При подаче положительных импульсов достаточной амплитуды U_m сразу на оба входа селектора транзисторы отпираются и приходят в состояние насыщения. В этом состоянии, как известно, все электроды имеют весьма близкие потенциалы ($U_б \approx 0$ и $U_к \approx 0$) и насыщенный транзистор подобен короткозамкнутому элементу, у которого все три электрода стянуты в точку. Следовательно, после отпирания обоих транзисторов напряжение на выходе схемы падает почти до нуля. Если же положительный импульс поступит только на один вход, то выходное напряжение селектора будет неизменным, так как второй транзистор останется запертым.

9. СРАВНИВАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Сравнивающее устройство предназначено для сравнения напряжений. В момент равенства напряжений, поданных на два входа устройства, на его выходе появляется сигнал. Такие устройства применяют главным образом для сравнения постоянного или переменного напряжения с линейно изменяющимся (пилообразным) напряжением.

На рис. 22 приведены схемы сравнивающих устройств, предназначенных для сравнения постоянного напряжения U_0 с линейно изменяющимся напряжением. В устройстве, схема которого изображена на рис. 22, *а*, напряжение U_0, подводимое ко

входу *2*, запирает транзистор. Последний находится в запертом состоянии до тех пор, пока пилообразное напряжение, поданное на вход *1*, не возрастет до величины U_0, после чего транзистор отпирается и на выходе устройства появляется импульс.

На рис. 22, *б* показана схема двухкаскадного сравнивающего устройства на транзисторах T_1 (эмитерный повторитель) и T_2 (усилитель). На вход *1* подается напряжение U_0, а на вход *2*— линейно убывающее напряжение $U_л$, с которым сравнивается напряжение U_0. Так как на транзисторе T_1 собран эмиттерный повторитель, напряжение на его нагрузке $U_{R2} \approx U_0$. Это напряжение, действуя в эмиттерной цепи усилителя, запирает транзистор T_2. Последний находится в запертом состоянии, пока напряжение $U_л$, приложенное ко входу *2*, не станет по абсолютной величине меньше напряжения U_{R2}. В момент, когда $|U_л| = |U_0|$, транзистор T_2 отпирается и на выходе усилителя возникает импульс.

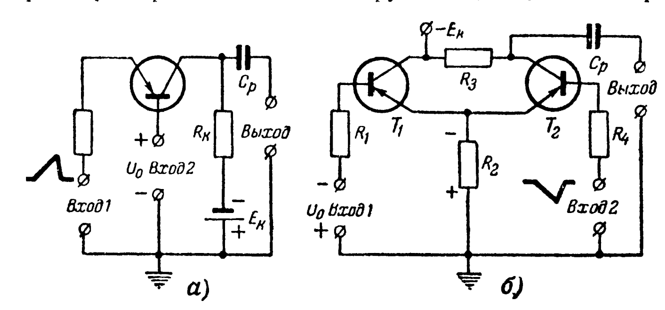


Рис. 22. Примеры сравнивающих устройств.

Более высокая точность срабатывания достигается в схемах сравнивающих устройств с положительной обратной связью.

10. ЭЛЕКТРОННЫЕ СЧЕТЧИКИ ИМПУЛЬСОВ

Двоичные счетчики. Рассмотренные в § 7 триггеры применяются в счетчиках, ведущих счет в двоичной системе счисления. Для того чтобы описание двоичного триггерного счетчика было более ясным, предварительно сообщим краткие сведения о двоичной системе счисления.

Система счисления, которой мы пользуемся при обычных арифметических вычислениях, — десятичная система, Она основана на представлении любого числа с помощью десяти различных цифр: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 и 9. Числа записываются в весьма простой форме вследствие использования идеи о разряде. Каждое число представляется в виде суммы целых степеней числа 10, и записываются только множители при степенях. Каждый такой множитель и является разрядом. Например, в числе 135 единица означает число сотен $(1 \cdot 10^2)$, Тройка — число десятков, $(3 \cdot 10^1)$, пятерка — число единиц $(5 \cdot 10^0)$, т. е.

$$135 = 1 \cdot 10^2 + 3 \cdot 10^1 + 5 \cdot 10^0.$$

Число 10 называют основанием системы счисления и записывают с помощью двух цифр: «10».

Помимо десятичной системы, применяются двоичная (основание — 2), троичная (основание — 3), восьмиричная (основание — 8) и другие системы счисления. Принципиально для записи чисел можно применять систему с любым основанием в виде целого числа.

В счетных устройствах широко используется двоичная система. Для записи чисел в такой системе требуется минимальное число цифр — всего две: 0 и 1. Основанием этой системы служит число 2. Иначе говоря, в двоичной системе все числа представляются в виде суммы целых степеней числа 2; например, число 135 можно записать так:

$$135=1\cdot 2^7+0\cdot 2^6+0\cdot 2^5+0\cdot 2^4+0\cdot 2^3+1\cdot 2^2+1\cdot 2^1+1\cdot 2^0,$$

откуда двоичное представление числа 135 получается в виде 10000111.

Для иллюстрации приведем несколько чисел, записанных в двоичной системе:

0 — нуль; 1 — один; 10 — два; 11 — три; 100 — четыре; 101 — пять; 110 — шесть, 111 — семь; 1000 — восемь; 1001 — девять; 1010 — десять; 1011 — одиннадцать; 1100 — двенадцать; 10000 — шестнадцать; 10100 — двадцать; 11110 — тридцать; 100000 — тридцать два; 101101 — сорок пять.

Основным преимуществом двоичной системы счисления является возможность использования для представления каждого разряда числа любого элемента (физического прибора), имеющего два различных устойчивых состояния равновесия. Характерным примером такого прибора служит триггер. Одно из устойчивых состояний равновесия триггера, как указывалось выше, соответствует нулю, а другое — единице. Кроме того, в двоичной системе счисления очень просты правила арифметических действий.

Рассмотрим устройство двоичного триггерного счетчика.

Двоичный счетчик представляет собой цепочку последовательно соединенных триггеров (ячеек). Каждый триггер перебрасывается из одного положения в другое отрицательным импульсом, подаваемым на его счетный вход.

Счетчик, состоящий из n триггеров, имеет коэффициент пересчета, равный 2^n. Это означает, что через каждые 2^n отрицательных импульсов, поданных на вход, на выходе появляется один отрицательный импульс. Так, например, схема из четырех триггеров образует счетчик с коэффициентом пересчета 16.

На рис. 23 приведена схема первой и четвертой ячеек двоичного счетчика, выполненного на электронных лампах. Промежуточные ячейки счетчика собраны по такой же схеме. Параллельно сопротивлениям анодной нагрузки левого (по схеме) триода лампы каждой триггерной ячейки подключены неоновые лампы *НЛ*, служащие для визуальной индикации состояния ячейки. Неоновая лампа горит, когда триггер находится в положении 1, и погашена, когда триггер в положении 0. На вход первой ячейки подаются подсчитываемые отрицательные импульсы. На вход каждой последующей ячейки поступают выходные

импульсы, снимаемые с анода правого (по схеме) триода лампы предыдущей ячейки.

В начальном состоянии все ячейки находятся в положении 0. После подачи на вход счетчика первого отрицательного импульса переключается первый триггер: правый триод лампы запирается, а левый отпирается. Ток левого триода лампы создает на анодном сопротивлении R_a напряжение, которое зажигает неоновую лампу, указывающую на то, что первый триг-

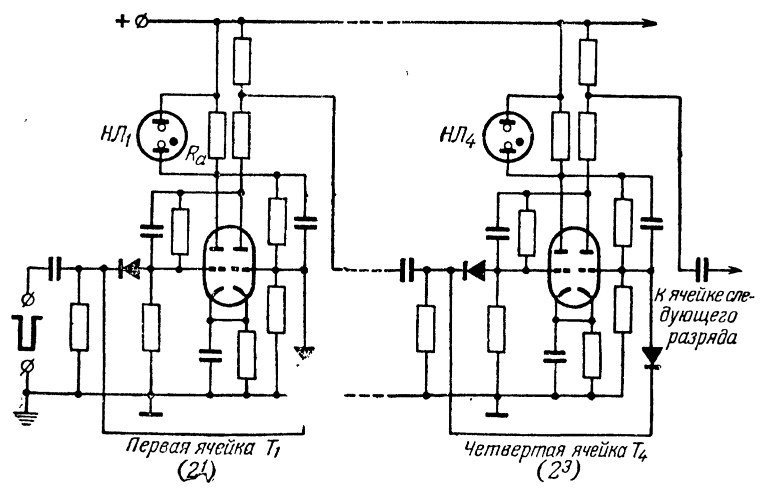


Рис. 23. Схема двоичного триггерного счетчика.

гер находится в положении 1. Поскольку после переключения напряжение на аноде правого триода лампы скачком повышается, на вход второй ячейки поступает положительный импульс. Он не может переключить вторую ячейку вследствие наличия диодов в сеточных цепях лампы.

После подачи второго импульса на вход счетчика происходит новое переключение первого триггера (из положения 1 в положение 0) и неоновая лампа гаснет. При этом напряжение на аноде правого триода падает и на выходе появляется отрицательный импульс, который передается на вход второго триггера и вызывает его переключение из положения 0 в положение 1. В этом положении загорается неоновая лампа второго триггера.

Третий импульс, поступающий на вход счетчика, вызывает очередное переключение первого триггера, в то время как положение второго не меняется. При этом загорается лампа первого триггера и продолжает гореть лампа второго. Это показывает, что первая и вторая ячейки счетчика находятся в положении 1. Так как первая ячейка соответствует младшему разряду числа в двоичной системе 2^0, вторая ячейка — разряду 2^1, третья — 2^2 и т. д., горящие неоновые лампы первого и второго

триггеров указывают, что в счетчике зафиксировано число 11 в двоичной системе, т. е. три.

Четвертый импульс на входе счетчика переключает первый триггер из положения 1 в положение 0, выходной (отрицательный) импульс первого триггера переключает второй триггер из положения 1 в положение 0, выходной (отрицательный) импульс второго триггера вызывает переключение третьего триггера в положение 1. Выходной же импульс третьего триггера получается положительным, и переключения следующего, чет-

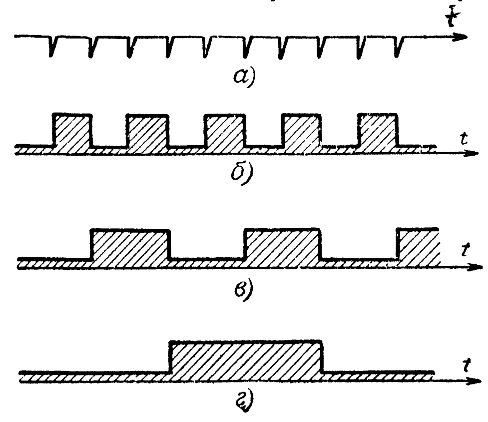


Рис. 24. Эпюры напряжений счетчика.

а — входные импульсы; *б* — импульсы на выходе триггера T_1; *в* — импульсы на выходе триггера T_2, *г* — импульсы на выходе триггера T_3.

вертого, триггера не происходит. Неоновые лампы первого и второго триггеров гаснут, а лампа третьего триггера зажигается. Счетчик фиксирует число 100, т. е. четыре.

Итак, переключение второго триггера вызывается каждым вторым импульсом, третьего триггера — каждым четвертым, четвертого триггера — каждым восьмым и т. д. Это иллюстрируется диаграммой состояний, приведенной на рис. 24.

Если счетчик состоит из n триггерных ячеек, то первый раз n-я ячейка переключится после поступления 2^{n-1} импульсов на вход счетчика. Но выходной импульс будет положительным, так как триггер переключится из положения 0 в положение 1. Для получения отрицательного импульса нужно подать на вход еще 2^{n-1} импульсов. Таким образом, после 2^n входных импульсов на выходе счетчика появится отрицательный импульс и все триггеры займут исходное положение.

Десятичные счетчики. Десятичные, или декадные, счетчики представляют собой ряд счетных декад. Каждая декада осуществляет пересчет на 10. Она состоит из двоичных триггерных ячеек, ведущих счет в двоичной системе счисления. Десятичный счет достигается в результате применения особых схем соединения триггерных ячеек. Счетные декады строят по схеме последова-

тельного (каскадного) соединения двоичных триггерных ячеек с обратными связями между ячейками и по кольцевым схемам.

В первом случае схема декады представляет собой цепочку из четырех последовательно соединенных триггерных ячеек со счетным входом (рис. 25). Для получения пересчета на десять в схеме осуществляется обратная связь между четвертой и третьей, а также между четвертой и второй ячейками.

Как и в обычном двоичном счетчике, триггер T_1 переключается каждым импульсом, поступающим на вход декады, триггер T_2 — после каждых двух импульсов, триггер T_3 — после каждых четырех. Для переключения триггера T_4 на вход должны быть поданы восемь импульсов. Это видно из приведенного на рис. 25 графика, иллюстрирующего состояние ячеек в зависимости от числа импульсов, поступивших на вход счетчика.

После того как восьмой импульс, установив первые три триггера в положение 0, переключает триггер T_4 из положения 0 в положение 1, напряжение на аноде A_{04} падает. Этот отрицательный перепад, поступающий через цепи обратной связи ($C_5Д_9$ и $C_5Д_{10}$) на входы тригегров T_2 и T_3, дополнительно переключает их. Такая операция равносильна тому, что счетчик как бы зарегистрировал еще шесть импульсов: переключение триггера T_2 соответствует дополнительной подаче на вход счетчика двух, а переключение триггера T_3 — еще четырех импульсов. Таким образом, после восьми входных импульсов и дополнительных переключений триггеров T_2 и T_3 через цепи обратной связи счетчик находится в положении 0 (T_1), 1 (T_2), 1 (T_3) и 1 (T_4), что соответствует числу 0111 в двоичной системе счисления (числу 14 в десятичной системе).

Девятый входной импульс перебрасывает первый триггер из положения 0 в положение 1, не меняя состояний всех остальных ячеек. Положение счетчика такое же, как у обычного двоичного счетчика после 15 импульсов (1111 в двоичной системе). Десятый импульс переключает все ячейки в положение 0. При этом с анода A_{14} отрицательный импульс поступает на следующую декаду. Таким образом, рассмотренная схема пересчитывает на десять.

Изложенный способ уменьшения коэффициента пересчета с 16 до 10 с помощью обратной связи, получивший название «16—6», не является единственно возможным. В счетчике, состоящем из четырех триггерных ячеек, коэффициент пересчета на десять можно получить 35 способами. Наиболее широкое практическое применение получили схемы «16—6», «8+2» и некоторые другие.

Счетчик емкостью 10^n импульсов состоит из n декад. Быстродействие счетчика определяется быстродействием первой от входа декады, т. е. декады младшего разряда, так как она считает все m импульсов, поступающих на вход счетчика. Вторая декада считает в 10 раз меньше, третья — в 100 раз меньше и т. д. А быстродействие декады определяется быстродействием первого триггера.

Триггерные пересчетные схемы, построенные на двойных ламповых триодах, например типа 6Н3П, могут считать до нескольких миллионов импульсов в секунду. В качестве примера на рис. 26 приведена декада младшего разряда счетчика, пред-

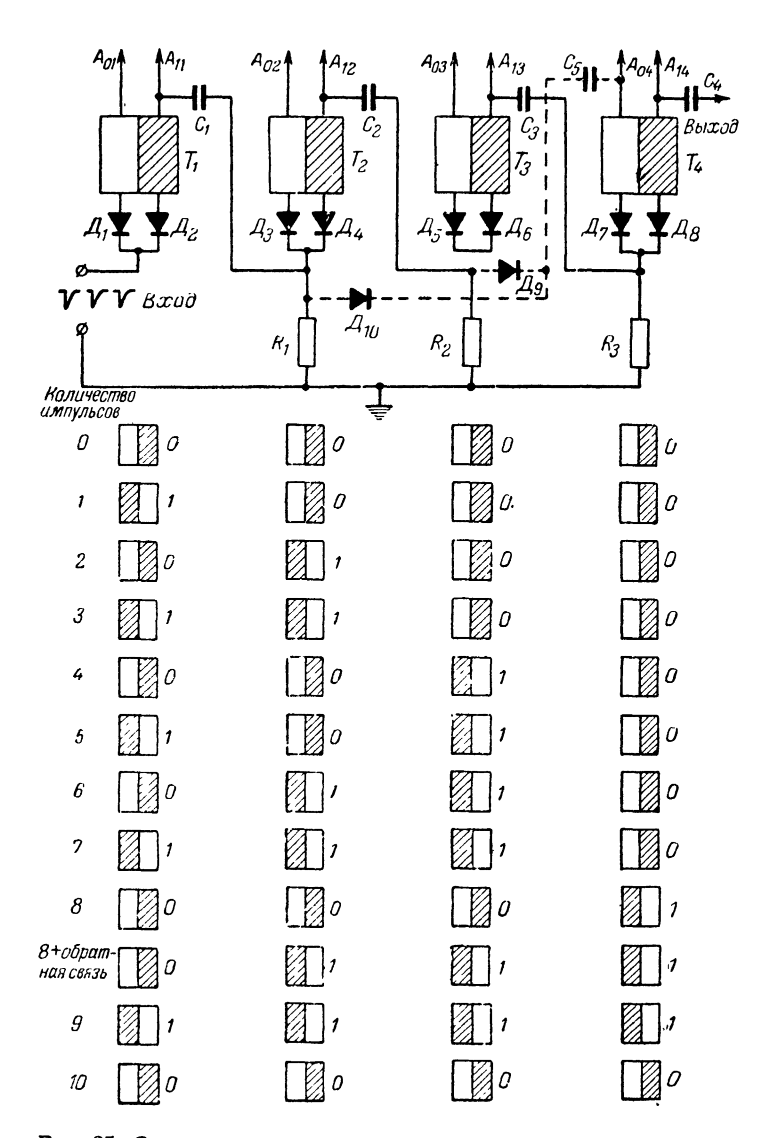


Рис. 25. Схема счетной триггерной декады (исходное положение; пунктиром показаны цепи обратной связи) и графическое изображение состояний триггеров после подачи любого числа импульсов.

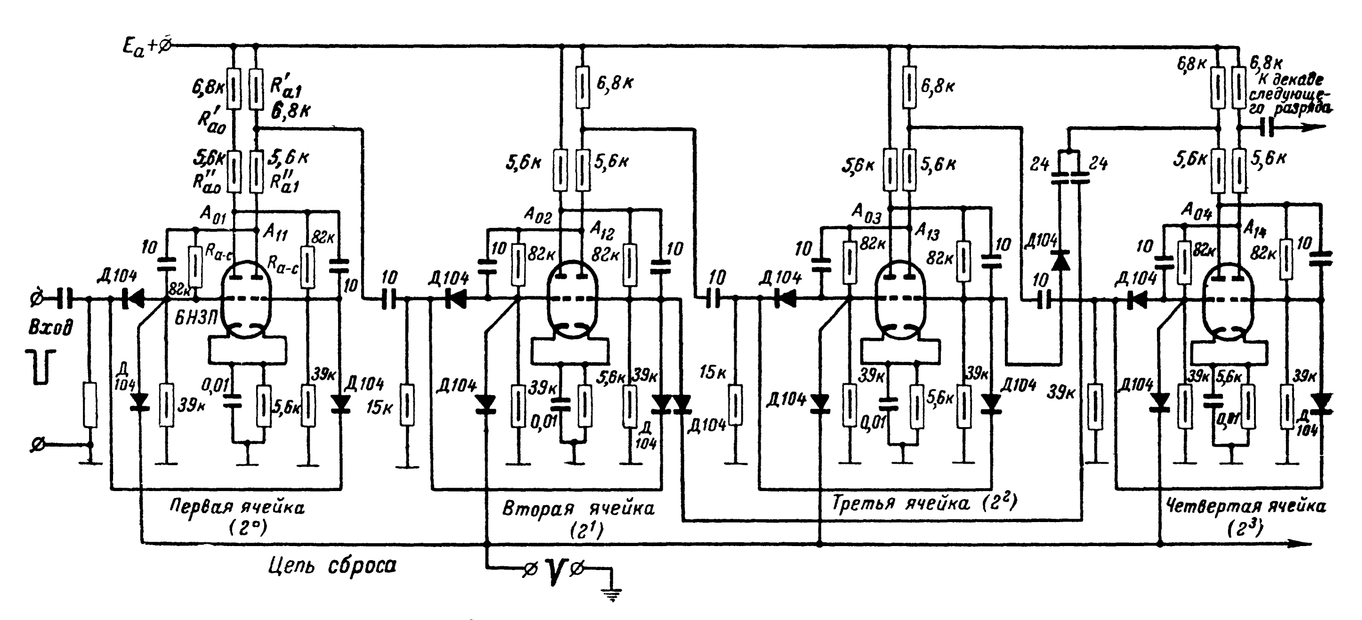
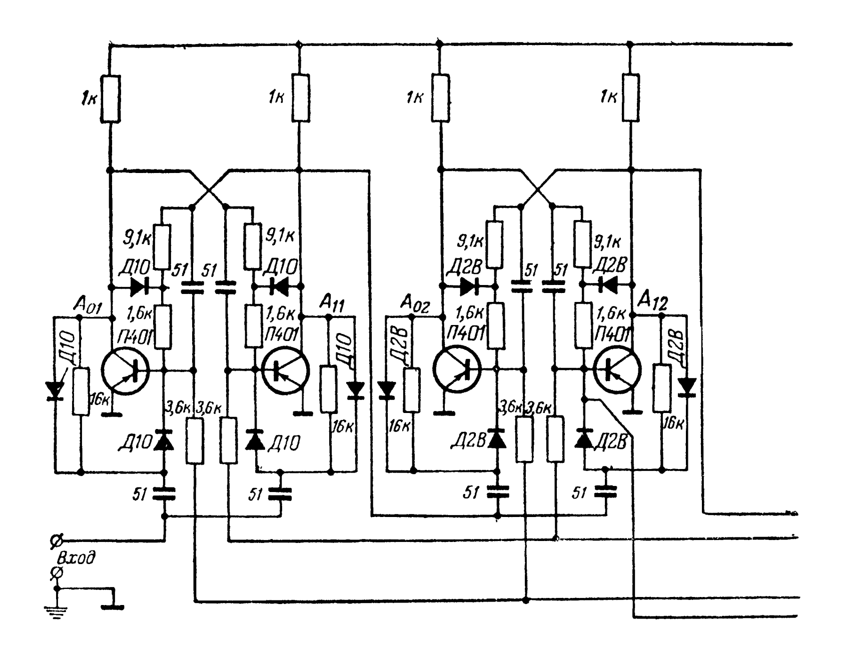


Рис. 26. Счетная декада на электронных лампах.



назначенного для счета импульсов, следующих с частотой 1 *Мгц*. Предусмотренная в схеме цепь сброса позволяет возвращать все ячейки счетчика в нулевое положение путем подачи отрицательного импульса одновременно на ячейки всех левых (по схеме) триодов ламп триггеров.

Счетчики на транзисторах. Триггерные декады на транзисторах строятся по тому же принципу, что и ламповые. Ячейки обычно представляют собой ненасыщенные транзисторные триггеры со счетным входом. Переключение триггера осуществляется положительным импульсом, подаваемым через диоды одновременно на обе базы.

Быстродействие транзисторного счетчика определяется главным образом характеристиками транзисторов. Применение высокочастотных транзисторов типов П401, П402, П403 и др. в счетчиках, выполненных из обычных ненасыщенных триггеров на двух транзисторах, позволяет получить предельную частоту счета до 3—5 *Мгц*. Дальнейшее увеличение скорости счета достигается дополнительным введением в схему триггера эмиттерных повторителей и корректирующих индуктивностей.

Транзисторный счетчик, одна декада которого приведена на рис. 27, считает импульсы с частотой следования до 5 *Мгц*[1]. Все триггеры выполнены на транзисторах П401 по схеме со счетным

[1] Колпаков И. Ф., «Приборы и техника эксперимента», 1962, № 6.

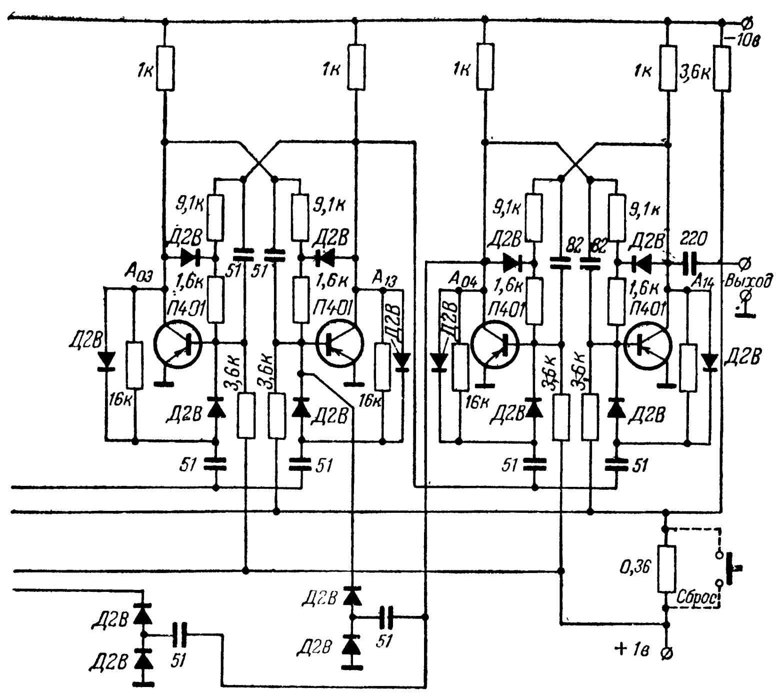


Рис. 27. Счетная декада на транзисторах.

входом (импульсы положительной полярности подаются через диоды на базы обоих транзисторов). Выходные положительные импульсы снимаются с коллекторов транзисторов.

Состояние 0 каждого триггера характеризуется отсутствием тока через левый (по схеме) транзистор и наличием тока в цепи правого, а состояние 1 — отсутствием тока через правый и наличием его через левый.

Принцип действия транзисторной декады не отличается от принципа действия ламповой. До прихода восьмого импульса декада считает, как обычный двоичный счетчик. Восьмой импульс перебрасывает четвертый триггер из положения 0 в положение 1. При этом на коллекторе A_{04} возникает положительный импульс, который подается через цепи обратной связи на базы правых (по схеме) транзисторов второго и третьего триггеров. В результате воздействия импульса обратной связи эти транзисторы, не успев полностью отпереться, снова запираются и, таким образом, второй и третий триггеры оказываются в состоянии 1. Далее, все процессы аналогичны процессам, происходящим в ламповой схеме. Десятый положительный импульс на входе, устанавливая триггеры в положение 0, вызывает появление на выходе A_{14} положительного импульса, который поступает на вход следующей декады.

Кнопка «Сброс» предусмотрена для сброса показаний счетчика на нуль. При нажатии кнопки базы правых транзисторов всех триггеров соединяются с источником смещения плюс 1 *в*. Когда же кнопка отпускается, базы отключаются от источника 1 *в* и подключаются через сопротивление 3,6 *ком* к источнику коллекторного питания минус 10 *в*. В результате этого все триггеры приходят в состояние 0.

Описанная декада обеспечивает счет до 5 млн. импульсов в секунду с амплитудой более 2,5 *в* и длительностью более 20 *нсек*.

Счетчики на туннельных диодах. В последнее время широкое распространение получили счетчики на туннельных диодах. Объясняется это многими достоинствами таких приборов: малыми

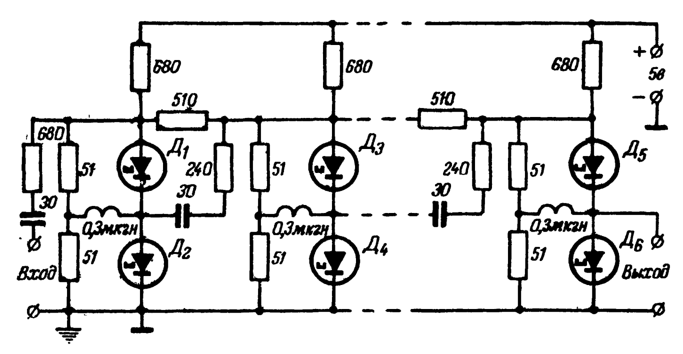


Рис. 28. Пример схемы счетчика на туннельных диодах.

габаритами и весом, малой потребляемой мощностью (в несколько раз меньшей, чем у транзисторов), очень высокими рабочими частотами, устойчивой работой в широком интервале температур (до 400° С), простотой изготовления и др.

Счетчики на туннельных диодах не отличаются по способу выполнения от ламповых и транзисторных. Они образуются последовательным соединением триггерных ячеек (см. стр. 34), переключаемых положительными импульсами.

На рис. 28 приведена схема двоичного счетчика импульсов на туннельных диодах *Д* типа Р-2 (гр. Г), позволяющая получить скорость счета до 60 *Мгц* (авторы В. В. Изох и М. К. Ефимчик). Амплитуда запускающего импульса 50, а выходного 250 *мв*. Диоды одной и той же ячейки можно считать идентичными, если разброс их величин максимальных токов не превышает ±5%.

Другие типы счетчиков. При сравнительно невысоких частотах следования импульсов в качестве счетчиков нередко используют декатроны[1] — многокатодные газоразрядные приборы. Схемы на декатронах характеризуются экономичностью, малым ко-

---

[1] По литературным данным (зарубежным) уже имеются декатроны, позволяющие вести счет со скоростью 1 млн. импульсов в секунду.

личеством деталей, надежностью и простотой индикации (хотя последняя не совсем удобна).

Более высокие скорости счета могут быть реализованы с помощью другого вида специальных приборов — трохотронов. Это электронные переключатели, действие которых основано на управлении потоком электронов, движущихся во взаимно-перпендикулярных однородных электрических и магнитных полях по трохоидальным траекториям. Кольцевые трохотроны позволяют вести счет с частотой до 5 *Мгц*.

11. УСТРОЙСТВА ЦИФРОВОГО ОТСЧЕТА СЧЕТЧИКОВ

Цифровые индикаторы. Для индикации результатов счета служит устройство цифрового отсчета. В его состав входят цифровые индикаторы и дешифраторы. В современных измерительных приборах применяются разнообразные цифровые индикаторы. Рассмотрим некоторые из них.

С в е т о в о е т а б л о. Оно состоит из колонок маленьких неоновых ламп или ламп накаливания, размещенных в продолговатых пазах в передней панели прибора, количество которых равно числу декад счетчика. В каждый паз вставлена пластинка,

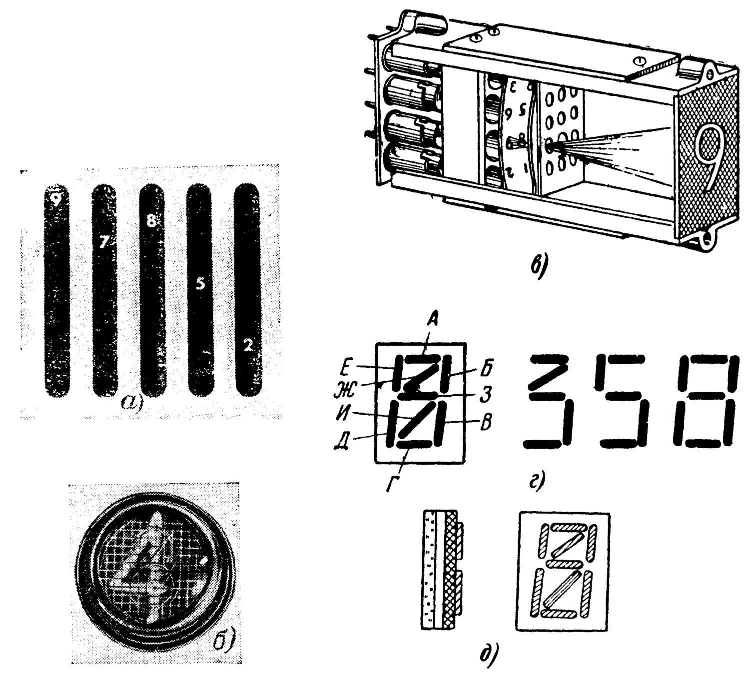


Рис. 29. Примеры устройств цифрового отсчета.

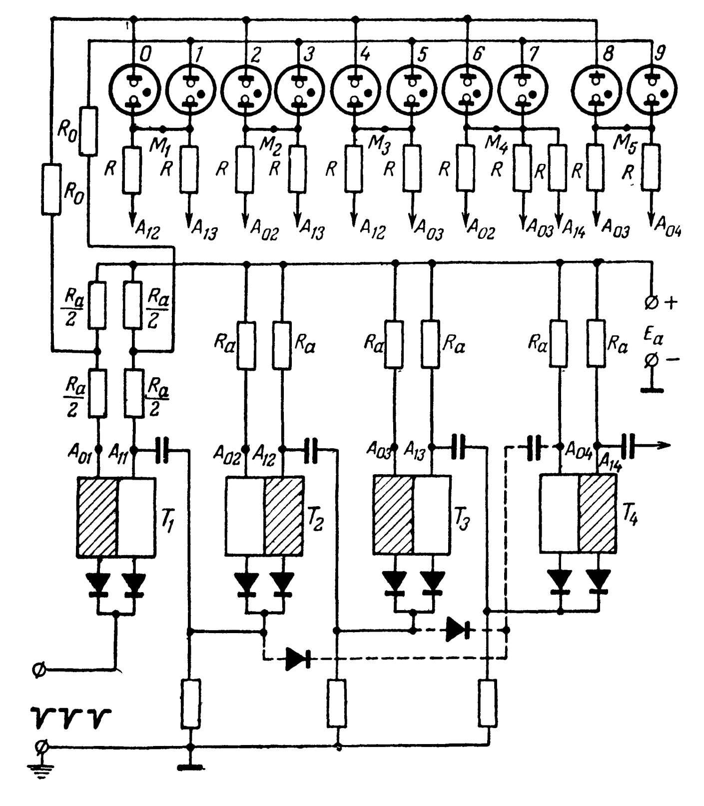


Рис. 30. Интерполяционная схема включения неоновых индикаторов.

у которой на темном фоне имеются прозрачные цифры от 0 до 9. За каждой цифрой помещается неоновая лампа (лампа накаливания), которая при включении освещает данную цифру (рис. 29, *а*).

Лампы включаются по так называемой интерполяционной схеме (рис. 30), не требующей применения специального дешифратора. Все они разбиты на две группы. Лампы, подсвечивающие цифры 0, 2, 4, 6, 8, образуют одну группу. Их верхние (по схеме) электроды подключены к шине, называемой четной. Эта шина присоединена к средней точке нагрузочного сопротивления левой половины первого триггера. Вторая группа ламп, относящихся к цифрам 1, 3, 5, 7, 9, своими верхними электродами подключена к шине, называемой нечетной и выходящей из средней точки нагрузочного сопротивления правой половины первого триггера. Нижние электроды ламп, соединенные попарно (*0* и *1*, *2* и *3*, *4* и *5*, *6* и *7*, *8* и *9*), подведены к точкам *М* (сред-

ним точкам двух сопротивлений R, концы которых определенным образом подключены к анодам ламп триггеров).

Сопротивления $R_а$ триггера выбраны таким образом, чтобы падение напряжения $\Delta U_а$ на нагрузке $R_а$ отпертой лампы обеспечивало выполнение следующих соотношений:

$$\Delta U_а > U_{заж} > \frac{\Delta U_а}{2} \qquad (15)$$

и

$$\frac{\Delta U_а}{2} < U_{гаш}, \qquad (16)$$

где $U_{заж}$ и $U_{гаш}$ — соответственно напряжения зажигания и гашения неоновой лампы.

Триггер T_1 переключается каждым импульсом. Поэтому после каждого импульса изменяются потенциалы четной и нечетной шин. Если триод триггера, к аноду которого подключена данная шина, заперт, то напряжение на этой шине равно $E_а$; если же триод отперт, то напряжение на шине, связанной с ним, составляет $E_а - \frac{\Delta U_а}{2}$. Таким образом, потенциал верхнего электрода неоновой лампы может принимать значения либо $E_а$, либо $E_а - \frac{\Delta U_а}{2}$.

С другой стороны, потенциал в точке M подключения нижнего электрода неоновой лампы получается равным $E_а - \Delta U_а$, когда отперты оба триода, к анодам которых подсоединены концы сопротивлений $R = R_а$, выходящих из данной точки M. Когда же отперт лишь один триод $\left(\text{анодное напряжение } E_а - \frac{3}{4}\Delta U_а\right)$, а второй заперт $\left(\text{анодное напряжение } E_а - \frac{1}{4}\Delta U_а\right)$, потенциал точки M относительно „земли" равен $E_а - \frac{\Delta U_а}{2}$.

Изложенное позволяет заключить, что неоновая лампа будет гореть только тогда, когда потенциал шины, связанной с верхним электродом лампы, равен $E_а$ (шина под высоким потенциалом), а точка M, с которой соединен нижний электрод этой лампы, имеет потенциал $E_а - \Delta U_а$ (тогда разность потенциалов между электродами неоновой лампы составит $\Delta U_а$, что обеспечивает зажигание лампы).

Для удовлетворения второго условия нужно концы сопротивлений R, соответствующих каждой паре неоновых ламп, подключить к анодам тех триодов триггеров, которые проводят только тогда, когда числа, зафиксированные в счетчике, равны номерам неоновых индикаторов данной пары. При всяком другом числе аноды этих триодов должны иметь высокие потенциа-

лы. Пользуясь рис. 25, легко определить схему соединений каждой пары:

$$0 — 1 \text{ к } A_{12} \text{ и } A_{13};$$
$$2 — 3 \text{ к } A_{02} \text{ и } A_{13};$$
$$4 — 5 \text{ к } A_{12} \text{ и } A_{03};$$
$$6 — 7 \text{ к } A_{02}, A_{03} \text{ и } A_{14};$$
$$8 — 9 \text{ к } A_{03} \text{ и } A_{04}.$$

Пара *6—7* подключается, кроме анодов A_{02} и A_{03}, еще к аноду A_{14} (через диод), что исключает загорание неоновых ламп *6* или *7*, когда в счетчик проходят *8* или *9* импульсов. В любом из последних двух случаев точка *M* оказывается соединенной через сопротивление *R* с анодом A_{14}, имеющим высокий потенциал.

Достоинством такой системы цифровой индикации являются простота устройства и отсутствие специального дешифратора, а недостатком — большое количество ламп, громоздкость и неудобство отсчета. Последнее связано с малым размером цифр и расположением их на разных уровнях в колонках, соответствующих различным разрядам.

Цифровые газоразрядные индикаторы. В качестве примера может быть назван цифровой индикатор тлеющего разряда типа ИН-1 Система электродов этого индикатора состоит из десяти катодов, выполненных в форме арабских цифр 0, 1, . . ., 9, и анода, выполненного в форме сетчатого диска. При подаче напряжения между анодом и выбранным катодом возникает тлеющий разряд в неоне Катодное свечение разряда обеспечивает индикацию соответствующего цифрового символа, наблюдаемого через купол лампы (рис. 29,*б*).

Катоды смонтированы на двух алундированных стойках и изолированы друг от друга керамическими шайбами. Черненый экран, находящийся между катодами и токоподводящими траверсами, препятствует напылению материала катодов на изоляционное покрытие и устраняет отблески свечения от ножки и колбы.

Основные параметры прибора ИН-1: напряжение зажигания — не более 200 *в*, рабочий ток 2,5—3 *ма*, напряжение горения (при токе 2,5 *ма*) — около 140 *в*, долговечность — не менее 500 *ч*, сила света (при токе 2,5 *ма*) от 6—8 до 18—19 *мсв*, дальность наблюдения — около 3 *м*.

Такой индикатор подключается к анодам триггеров счетной декады через специальный дешифратор.

Проекционное отсчетное устройство. Оно состоит из нескольких блоков — по числу десятичных разрядов, индицируемых на передней панели счетчика. В каждом блоке имеется десять элементарных проекторов (соответственно числу цифр каждого разряда). Принцип действия проектора поясняется оптической схемой, изображенной на рис. 29, *в*.

Луч света лампочки, питаемой от дешифратора, через рассеивающий светофильтр освещает пластинку. На этой пластинке прозрачны только цифры, вся остальная ее поверхность не пропускает световых лучей. Между пластинкой и экраном помещен

объектив, вследствие чего на экране получается увеличенное изображение цифры.

Система освещаемых пазов. Комбинации освещаемых пазов образуют различные цифры. Известны системы, состоящие из семи, восьми и девяти элементов — пазов. Наиболее совершенным представляется девятиэлементное устройство.

В передней панели такого устройства, выполненной из изоляционного материала, профрезерованы девять пазов (рис 29,*г*) Каждый паз подсвечивается отдельной лампочкой. С лицевой стороны панель покрыта прозрачной пластинкой, служащей экраном. Иногда между пазами и экраном помещают цветной фильтр, придающий цифрам окраску в желаемый цвет (например, красный) и увеличивающий контрастность изображения. В зависимости от комбинаций пазов, освещаемых лампочками, которые питаются напряжениями дешифратора, получаются различные цифры. Так, цифра 1 наблюдается, если подсвечиваются пазы *Ж*, *Б*, *В*; цифра 3 создается комбинацией *А*, *Ж*, *З*, *В*, *Г*; цифра 8 — комбинацией *А*, *Б*, *В*, *Г*, *Д*, *Е*, *З* и т. д.

Устройство из девяти пазов обеспечивает получение всех цифр от 0 до 9 одного разряда. Для управления устройством необходимо преобразовать двоичный код в девятиричный.

Электролюминесцентные цифровые индикаторы. Они выполняются следующим образом (рис. 29, *д*). На стеклянную пластинку наносится проводящий прозрачный слой. Этот слой, служащий общим электродом, покрывается тонким (несколько микрон) слоем фосфо́ра, являющегося диэлектриком. На фосфо́р накладывается тонкая алюминиевая пленка, которой с помощью трафарета придается определенная форма, например в виде девяти элементов, аналогичных девяти пазам предыдущей системы индикации (как на рис. 29, *г*). Каждый из этих алюминиевых элементов имеет отвод и служит вторым электродом. При подаче переменного напряжения на общий электрод и определенные элементы изменяется напряженность поля в фосфо́ре, что вызывает его свечение. Цвет свечения зависит от состава фосфо́ра, а яркость — от величины напряжения и его частоты. Благодаря тому, что слой фосфо́ра очень тонок, границы элементов не размыты и отчетливо видны. Цифры от 0 до 9 получаются при различных комбинациях элементов, как и в предыдущем случае.

Такая система индикации обладает многими достоинствами: сравнительной простотой, компактностью, малым потреблением мощности, что позволяет использовать ее в транзисторных счетчиках с высокой скоростью отсчета. Кроме того, электролюминесцентные индикаторы позволяют регистрировать показания непосредственно на светочувствительной бумаге. Недостатком системы является сложность дешифратора, преобразующего напряжения, даваемые счетчиком в двоичном коде, в девятиричный (семиричный, восьмиричный — при семи, восьми элементах).

Дешифраторы. Эти устройства имеют *M* входов и *N* выходов. Они служат для преобразования определенной кодовой комбинации, подаваемой в форме напряжения на входы, в напряжение на соответствующем выходе. Так, например, если у дешифратора четыре входа и десять выходов, то при подаче на входы число 0101 (пять) напряжение появится на выходе *5*.

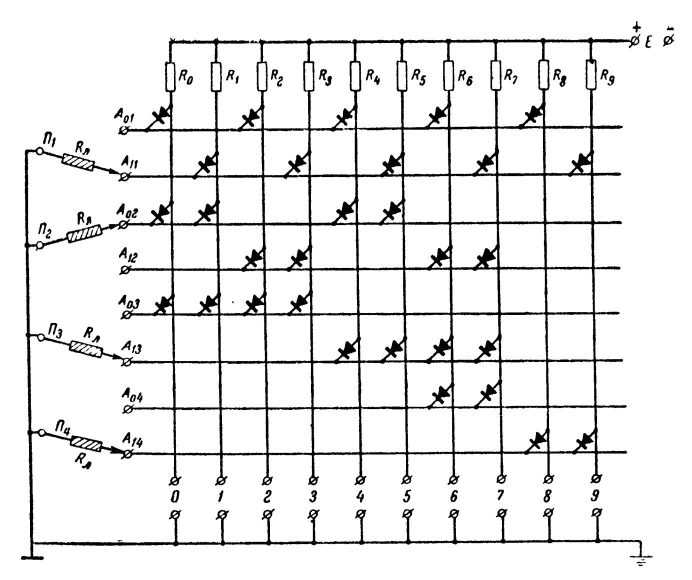


Рис. 31. Схема матричного дешифратора.

В случае замены числа 0101 числом 0111 (семь) напряжение на входе *5* исчезнет и появится на выходе *7*.

Широко применяется схема дешифратора, получившая название диодной матрицы (рис. 31). Рассмотрим принцип ее построения, относя все рассуждения к ламповой триггерной декаде.

Горизонтальные шины представляют собой провода, идущие от анодов ламп триггера. Каждая вертикальная шина соединяет «плюс» источника напряжения через сопротивление $R_к$ (одно из сопротивлений R_0—R_9) с верхним зажимом k-го выхода дешифратора (k=0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9). Все нижние зажимы заземлены. Общих точек у горизонтальных и вертикальных шин нет, т. е. между ними нет непосредственных соединений.

В зависимости от состояния i-го триггера (0 или 1) соответствующий анод A_{1i} или A_{0i} оказывается подключенным через внутреннее сопротивление $R_л$ отпертой лампы к заземленной шине. Другой анод в это время изолирован от «земли». Так, например, если первая ячейка находится в состоянии 0, т. е. проводит ее правая половина (рис. 25), то к «земле» подключена шина A_{11}, а шина A_{01} от «земли» изолирована. Если же i-я ячейка находится в положении 1, то с «землей» соединяется шина A_{0i} (изолирована шина A_{1i}). На рис. 31 триггеры условно изображены в виде переключателей, в цепи ключей которых включены сопротивления $R_л$.

Напряжение источника E подается через сопротивление R_k на выход только в том случае, если k-я, вертикальная шина не соединена с „землей" через сопротивленне $R_л$ и внутреннее

сопротивление $R_д$ отпертого диода. В противном случае напряжение на k-м выходе $U_k = E \frac{R_д + R_л}{R_k + R_д + R_л}$. При $R_k \gg R_д + R_л$ напряжение $U_k \ll E$.

Таким образом, для получения напряжения E только на k-м выходе, когда в счетной декаде зафиксировано число k в двоичной системе, k-я вертикальная шина должна быть отключена от горизонтальных шин, соединенных с «землей» в данном положении счетчика. Все остальные вертикальные шины при этом, наоборот, должны быть подключены к горизонтальным шинам, заземленным через проводящие плечи триггеров.

Выполнения указанного условия можно добиться, включив между вертикальными и горизонтальными шинами в определенном порядке диоды и выбрав напряжение источника E таким, чтобы оно было меньше напряжения анода запертой лампы и больше напряжения анода отпертой. Диод проводит тогда, когда горизонтальная шина соединяется с «землей» через отпертую лампу. Когда на горизонтальной шине высокое напряжение (лампа заперта), диод не проводит и вертикальная шина изолирована от горизонтальной.

К каждой вертикальной шине подключаются диоды, связывающие ее с горизонтальными шинами. Очевидно, что если все диоды, принадлежащие определенной вертикальной шине, заперты, то она изолирована от «земли» и на ее выходе полное напряжение E. Для того чтобы на выходе k-й шины было напряжение в том случае, когда в счетчике зафиксировано число k в двоичной системе, необходимо подключить катоды диодов к горизонтальным шинам, имеющим высокие потенциалы в данном положении счетчика.

При изменении числа в счетчике упадет потенциал хотя бы на одной из горизонтальных шин, диод, подключенный к ней, отопрется и вертикальная шина окажется заземленной.

Для правильного включения диодов воспользуемся диаграммой состояний триггеров, приведенной на рис. 25. Из нее видно, что числам от 0 до 9 соответствуют высокие потенциалы на следующих анодах (горизонтальных шинах):

0 — A_{01}, A_{02}, A_{03}, A_{04}; 5 — A_{11}, A_{02}, A_{13}, A_{04};
1 — A_{11}, A_{02}, A_{03}, A_{04}; 6 — A_{01}, A_{12}, A_{13}, A_{04};
2 — A_{01}, A_{12}, A_{03}, A_{04}; 7 — A_{11}, A_{12}, A_{13}, A_{04};
3 — A_{11}, A_{12}, A_{03}, A_{04}; 8* — A_{01}, A_{12}, A_{13}, A_{14};
4 — A_{01}, A_{02}, A_{13}, A_{04}; 9 — A_{11}, A_{12}, A_{13}, A_{14}.

Соответственное подключение диодов и образует матрицу двоично-десятичного дешифратора счетной декады. Путем несложных рассуждений можно убедиться в том, что достаточно включить в схему дешифратора 30 диодов. Как видно из рис. 25, нет необходимости в диодах между горизонтальной шиной A_{04}

* После действия импульса обратной связи.

и вертикальными шинами *0*, *1*, *2*, *3*, *4* и *5*, так как комбинации положений первых трех триггеров (высоких потенциалов анодов ламп), соответствующие каждому из этих чисел, больше ни при каких числах не повторяются. По той же причине не требуются диоды между вертикальными шинами *8* и *9* и горизонтальными шинами A_{12} и A_{13}. В то же время отсутствие диодов между шиной A_{04} и шинами *6* и *7* привело бы к неопределенности, поскольку положение первых трех триггеров одинаково при числах *6* и *8*, а также числах *7* и *9* (лишь использование различия положений четвертого триггера при указанных числах позволяет получить однозначность).

12. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ВРЕМЕННО́ГО ИНТЕРВАЛА В ЧИСЛО

Преобразование измеряемого временно́го интервала Δt в пропорциональное ему число импульсов достигается заполнением этого интервала вспомогательными короткими импульсами с известным периодом следования T_c (рис. 32, *а*). Подсчет числа импульсов m, попадающих в интервал Δt, позволяет определить длительность его по формуле

$$\Delta t = mT_c = \frac{m}{F_c}, \tag{17}$$

где $F_c = \frac{1}{T_c}$ — частота следования вспомогательных импульсов.

Функциональная схема устройства, работа которого основана на изложенном методе, приведена на рис. 32, *б*. Генератор импульсов вырабатывает короткие по сравнению с измеряемым интервалом однополярные импульсы стабильной частоты следования. До начала измерений триггер[1] находится в положении 0. При этом импульсы генератора, поступающие на один вход временно́го селектора, не могут пройти в счетчик, так как на втором входе селектора отсутствует нужное напряжение.

Когда на вход прибора подается опорный импульс, соответствующий началу измеряемого временно́го интервала Δt, он переключает триггер из положения 0 в положение 1. Напряжение на выходе триггера резко возрастает. Интервальный импульс, задающий конец интервала, вновь переключает триггер, возвращая его в положение 0. При этом напряжение на выходе триггера резко падает.

Таким образом, триггер формирует прямоугольный импульс с крутыми фронтом и спадом, равный по длительности измеряемому интервалу и называемый в радиотехнике стробирующим

---

[1] На рис. 32, *б* изображен триггер со счетным входом, применяемый в случае, когда оба импульса (опорный и интервальный), задающих временной интервал, поступают от одного источника. Когда же импульсы поступают от разных источников, их подают на два различных входа триггера.

(селекторным) импульсом [1]. Так как стробирующий импульс подается на второй вход селектора, за время действия этого импульса счетчик считает импульсы генератора, непрерывно поступающие на первый вход селектора. В измерительной технике импульс, задающий продолжительность счета, принято называть «временными воротами» [2].

Число импульсов, зафиксированное счетчиком и наблюдаемое оператором с помощью системы цифровой индикации, однозначно соответствует измеряемому интервалу. Если число импульсов, сосчитанных счетчиком, m, а частота их следования F_c, то со-

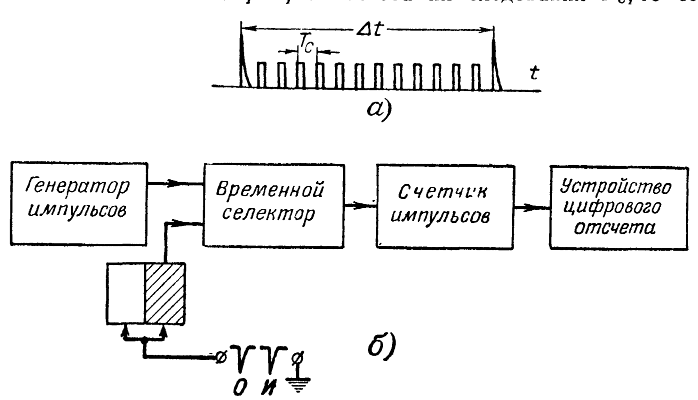


Рис. 32. Измерение временных интервалов методом дискретного счета.

гласно формуле (17) $\Delta t = \frac{m}{F_c}$. Для удобства непосредственного отсчета в секундах или долях секунды (миллисекундах, микросекундах) целесообразно выбирать частоту следования импульсов $F_c = 10^k$ *гц*, где $k = 1, 2, 3$.. Тогда $m = 10^k \Delta t$.

Таким же способом можно измерить и длительность прямоугольного импульса $\tau_и$. В этом случае измеряемый импульс подается непосредственно на второй вход селектора как стробирующий импульс.

Погрешность измерения временных интервалов определяется главным образом частотой следования импульсов генератора и ее стабильностью, разрешающим временем и количеством разрядов счетчика, а также погрешностью дискретности.

---

[1] Формирование стробирующего импульса с помощью триггера приемлемо только при измерении однократных временных интервалов. Если интервалы периодически повторяются, то применяют схему формирования, описываемую в § 18.

[2] Строго говоря, «временные ворота» — это устройство, которое, отпираясь на время, задаваемое стробирующим импульсом, пропускает импульсы, подлежащие счету, на вход счетчика импульсов. Однако условно «временными воротами» называют непосредственно стробирующий импульс.

Генератор импульсов обычно выполняется по схеме с кварцевой стабилизацией частоты. Вносимая им погрешность определяется степенью нестабильности частоты. Она, как правило, намного меньше остальных погрешностей. Современные счетчики, выполняемые по обычным схемам, обеспечивают скорость счета до 10^7 импульсов в секунду. Известны счетчики, позволяющие получать скорость счета до 100 млн. импульсов в секунду и выше.

Погрешность дискретности является следствием того, что импульсы генератора, заполняющие «временные ворота», не синхронизированы с моментами появления опорного и интервального импульсов, т. е. фронта и спада стробирующего импульса. Поэтому при многократном повторении опытов количество импульсов, проходящих в счетчик через селектор при неизменном периоде следования, будет неодинаковым: от опыта к опыту оно может изменяться на ± 1 импульс. Таким образом, максимальная погрешность дискретности составляет ± 1 младшего разряда счета (1 период следования импульсов).

Из-за ограниченной скорости счета, реализуемой в счетчиках, с высокой точностью можно измерять только сравнительно большие инервалы времени. Так, при скорости счета 10^7 импульсов в секунду (стабильность частоты генератора, например, 10^{-5}) абсолютная погрешность измерения интервала составит 0,1 *мксек*. Следовательно, интервал 1 *мксек* можно измерить с погрешностью не менее 10%. С погрешностью 0,01% (10^{-4}) при этих условиях может быть измерен интервал не менее 1 *мсек*, а с погрешностью 10^{-7} — интервал не менее 1 *сек*.

Преобразовать временной интервал в пропорциональное число импульсов можно также с помощью генератора ударного возбуждения. Для этого на вход последнего нужно подать стробирующий импульс, равный по длительности измеряемому временно́му интервалу Δt, либо в качестве стробирующего импульса — прямоугольный импульс, длительность которого необходимо измерить. За время действия стробирующего импульса генератор вырабатывает пакет импульсов. Число импульсов n в пакете связано с частотой генерируемых колебаний f и длительностью стробирующего импульса, т. е. шириной «временных ворот» Δt, следующей зависимостью:

$$n = f\Delta t. \qquad (18)$$

Существенно заметить, что поскольку импульсы генератора, подлежащие счету, синхронизированы с фронтом стробирующего импульса (синхронизация заложена в сущности работы генератора с контуром ударного возбуждения), максимальная погрешность дискретности при такой схеме измерения всегда имеет одинаковый знак.

Применяя генератор ударного возбуждения, нужно иметь в виду, что его стабильность не во всех случаях может оказаться достаточной для получения требуемой точности измерений.

13. ЭЛЕКТРОННЫЙ НОНИУС

Точность измерения временных интервалов методом последовательного дискретного счета можно повысить с помощью электронного нониуса[1]. Осуществление последнего требует вве-

дения в схему, приведенную на рис. 32, *б*, дополнительных элементов. На рис. 33, *а* изображена функциональная схема прибора с электронным нониусом. Его работа заключается в следующем.

Основной счетчик считает число импульсов основного генератора, заполняющих «временные ворота», ширина которых равна интервалу Δt между опорным и интервальным импульсами.

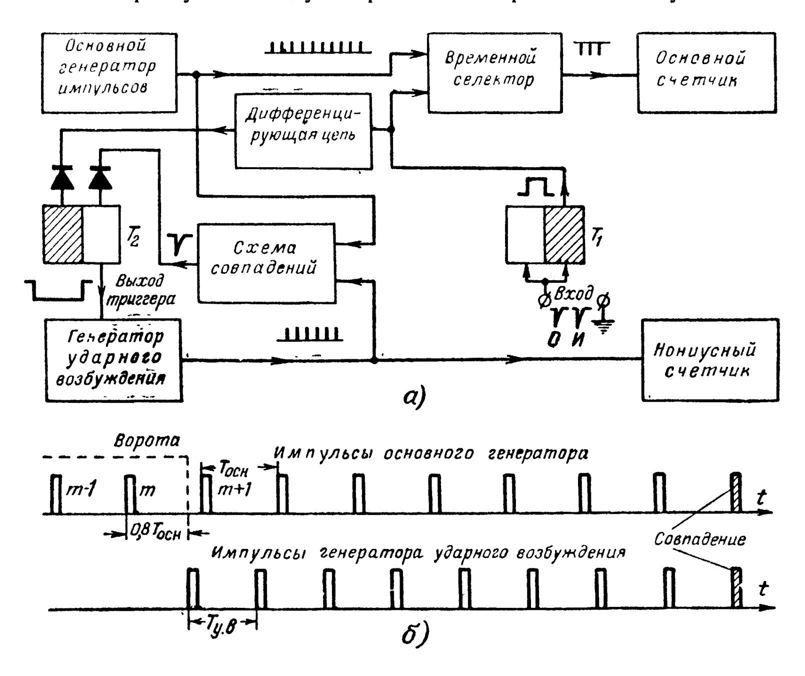


Рис. 33. Прибор с электронным нониусом.
а — функциональная схема; *б* — принцип получения нониуса.

В момент запирания основного счетчика отрицательный импульс, получаемый после дифференцирования спада «временных ворот», переключает вспомогательный триггер T_2 из положения 1 в положение 0. Образующийся на выходе триггера T_2 отрицательный перепад поступает на вход генератора ударного возбуждения, и последний начинает генерировать. Вырабатываемые им импульсы, частота следования $F_{у.в}$ которых находится в определенном соотношении с частотой следования $F_{осн}$ импульсов ос-

[1] Напомним, что в приборах для линейных измерений нониусом называют приспособление, позволяющее повысить точность отсчета (обычно до десятой доли деления основной шкалы).

новного генератора, подводятся к одному из входов схемы совпадений. На другой вход этой схемы непрерывно поступают импульсы основного генератора. При совпадении сигналов на обоих входах на выходе схемы совпадений появляется импульс, возвращающий триггер T_2 в исходное положение и, следовательно, прекращающий работу генератора ударного возбуждения.

По числу q импульсов, сосчитанных нониусным счетчиком, можно уточнить результат измерений, полученный с помощью основного счетчика. Сначала поясним это примером, а затем приведем общую формулу.

Выберем периоды следования импульсов основного генератора $T_{осн}$ и генератора ударного возбуждения $T_{у.в}$ так, чтобы они отличались на 0,1 $T_{осн}$, т. е. чтобы выполнялось соотношение $T_{осн}—T_{у в}=0{,}1\ T_{осн}$ или, что то же самое, $T_{у в}=0{,}9\ T_{осн}$ (рис. 33,*б*). Предположим, что «временные ворота» запираются через интервал, равный 0,8 $T_{осн}$, после того как в основной счетчик поступил m-й импульс. Это означает, что ошибка измерения временно́го интервала вследствие несовпадения спада стробирующего импульса «временных ворот» с m-м импульсом основного генератора составляет 0,8 $T_{осн}$.

Как видно из рис. 33,*б*, к моменту совпадения импульсов основного генератора и генератора ударного возбуждения в нониусный счетчик проходит 9 импульсов. Поскольку «цена деления» нониуса составляет 0,1 $T_{осн}$, к целому числу m периодов $T_{осн}$, сосчитанных основным счетчиком, должна быть прибавлена дробная часть, определяемая по показанию $q=9$ нониусного счетчика: $(9—1)\cdot 0{,}1\ T_{осн}=0{,}8\ T_{осн}$.

В общем случае, когда

$$T_{у.в} = \alpha T_{осн}, \qquad (19)$$

цена деления нониуса равна $(1-\alpha)T_{осн}$. Если нониусным счетчиком сосчитано q импульсов, то дробная часть измеряемого интервала составляет $(q-1)(1-\alpha)\cdot T_{осн} = \frac{(q-1)(1-\alpha)}{F_{осн}}$.

При подсчете в десятичной системе счисления коэффициент

$$\alpha = \frac{10^d - 1}{10^d}, \qquad (20)$$

где d — число дополнительных десятичных разрядов, получаемых с помощью нониуса. Так, например, если $d=2$, то $\alpha=0{,}99$ и цена деления нониуса составит 0,01 $T_{осн}$.

Таким образом, при показании m основного счетчика уточненное значение временно́го интервала определяется из выражения

$$\Delta t = \frac{1}{F_{осн}}\left[m + (q-1)(1-\alpha)\right] = \frac{1}{F_{осн}}\left[m + \frac{q-1}{10^d}\right]. \qquad (21)$$

Чтобы осуществить электронный нониус, нужно предъявить весьма жесткие требования к длительности и форме импульсов

обоих генераторов. Анализ показывает, что длительность импульсов любого из генераторов не может быть больше, чем $T_{осн}/10^d$, так как в противном случае совпадения будут получаться неоднократно и нониус перестанет выполнять свои функции.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

МЕТОДЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ВРЕМЕННОГО ИНТЕРВАЛА В НАПРЯЖЕНИЕ И КОМПЕНСАЦИОННЫЙ МЕТОД

14. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ВРЕМЕННОГО ИНТЕРВАЛА В НАПРЯЖЕНИЕ ПУТЕМ ЗАРЯДА КОНДЕНСАТОРА

Временные интервалы можно измерять, используя процесс заряда конденсатора от источника постоянного напряжения через активное сопротивление. Если построить схему измерения так (рис. 34,*а*), чтобы опорный импульс подключал конденсатор C и сопротивление R к источнику напряжения E, а интервальный импульс отключал их, то по величине напряжения

$$U_C = E\left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{RC}}\right), \qquad (22)$$

измеряемого электронным вольтметром *ЭВ* на обкладках конденсатора, можно определить интервал Δt.

Решив уравнение (22) относительно Δt, получим:

$$\Delta t = RC \ln \frac{E}{E - U_C}. \qquad (23)$$

Шкалу вольтметра можно проградуировать в единицах времени, если величина E фиксирована и поддерживается неизменной. Однако рассмотренная схема имеет существенный недостаток, заключающийся в том, что шкала прибора получается нелинейной.

Измерения можно значительно упростить, если заряжать конденсатор током постоянной величины. При этом шкала показывающего прибора получается линейной.

Известно, что заряд q конденсатора емкостью C и напряжение U_C на обкладках связаны соотношением

$$q = CU_C. \qquad (24)$$

Если конденсатор заряжается в течение интервала Δt постоянным током $I = \text{const}$, то его заряд за интервал определится из формулы

$$q = I\Delta t. \qquad (25)$$

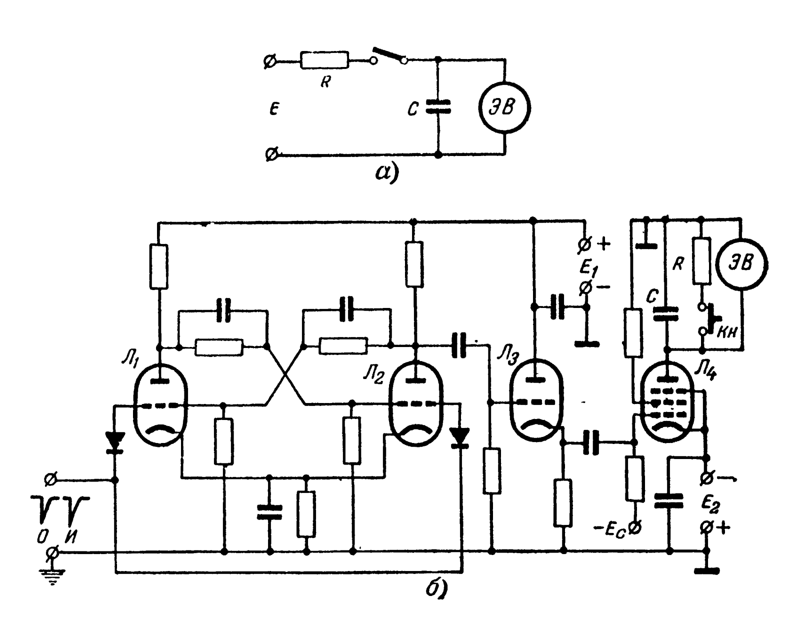


Рис. 34. К преобразованию временного интервала в напряжение путем заряда конденсатора.

Из выражений (24) и (25) находим

$$U_C = \frac{I}{C}\Delta t. \tag{26}$$

Так как $\frac{I}{C} = K$ — постоянная для данного устройства величина, напряжение на конденсаторе связано с измеряемым временным интервалом линейной зависимостью

$$U_C = K\Delta t. \tag{27}$$

Из выражения (27) видно, что на этом принципе можно построить прямопоказывающий прибор с линейной шкалой.

Рассмотрим схему устройства, в котором осуществляется описанный метод (рис. 34,*б*). Конденсатор *C* включен в анодную цепь пентода $Л_4$, который до начала измерений заперт. Опорный импульс, поступающий на вход триггера, переключает его, а интервальный импульс возвращает триггер в первонаначальное положение. На выходе триггера формируется положительный прямоугольный стробирующий импульс, длительность которого равна измеряемому временно́му интервалу Δt («временные ворота»).

Выходной импульс триггера подается через катодный повторитель ($Л_3$) на управляющую сетку пентода, отпирая его.

За время действия этого импульса конденсатор C заряжается через пентод почти постоянным током, так как рабочая точка выбрана на пологом участке анодной характеристики лампы. После окончания действия импульса пентод запирается и заряд конденсатора прекращается. Напряжение U_C, до которого конденсатор успевает зарядиться за время Δt, измеряется электронным вольтметром *ЭВ*. Шкала вольтметра градуируется в единицах времени. Перед началом следующего измерения конденсатор разряжается через сопротивление R нажатием кнопки *Кн*.

Рассмотренный метод существенно уступает по точности методу дискретного счета. Он позволяет измерять временные интервалы больше 10 *мксек* с погрешностью 1—2%. Пределы измерений можно изменять, переключая конденсаторы различной емкости и регулируя величину зарядного тока.

15. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ВРЕМЕННОЙ ИНТЕРВАЛ — СДВИГ ФАЗ — НАПРЯЖЕНИЕ

Измерение весьма малых временных интервалов с достаточно высокой точностью методами осциллографических разверток или дискретного счета связано с большим усложнением аппаратуры. Преобразование измеряемого интервала в напряжение по методу, изложенному в предыдущем параграфе, не всегда позволяет получать приемлемую точность измерений. Задачу измерения малых временных интервалов с небольшими погрешностями можно решить, применив двукратное преобразование: сначала преобразовать временной интервал в сдвиг фаз между двумя высокочастотными колебаниями, а затем сдвиг фаз — в напряжение.

Функциональная схема устройства, в котором осуществляется этот метод, показана на рис. 35. Преобразование временного интервала в сдвиг фаз достигается с помощью одновибраторов и генераторов с контурами ударного возбуждения, а преобразование сдвига фаз в напряжение — посредством фазового детектора.

Опорный импульс (рис. 36,*а*), подаваемый на вход *О*, возбуждает одновибратор, вырабатывающий прямоугольный импульс длительностью τ (рис. 36,*б*). Последний запускает высоко частотный генератор с контуром ударного возбуждения, продолжительность генерации которого определяется длительностью импульса τ (рис. 36,*г*). Интервальный импульс (рис. 36,*а*), по ступающий на вход *И*, возбуждает одновибратор своего канала, формирующий импульс также длительностью τ (рис. 36,*в*). Колебания генератора с контуром ударного возбуждения второго канала (рис. 36,*д*), запускаемого одновибратором, сдвинуты по фазе относительно колебаний генератора первого канала на угол φ, пропорциональный измеряемому временно́му интервалу:

$$\varphi = \omega\Delta t = 2\pi\frac{\Delta t}{T}, \tag{28}$$

где T — период высокочастотных колебаний.

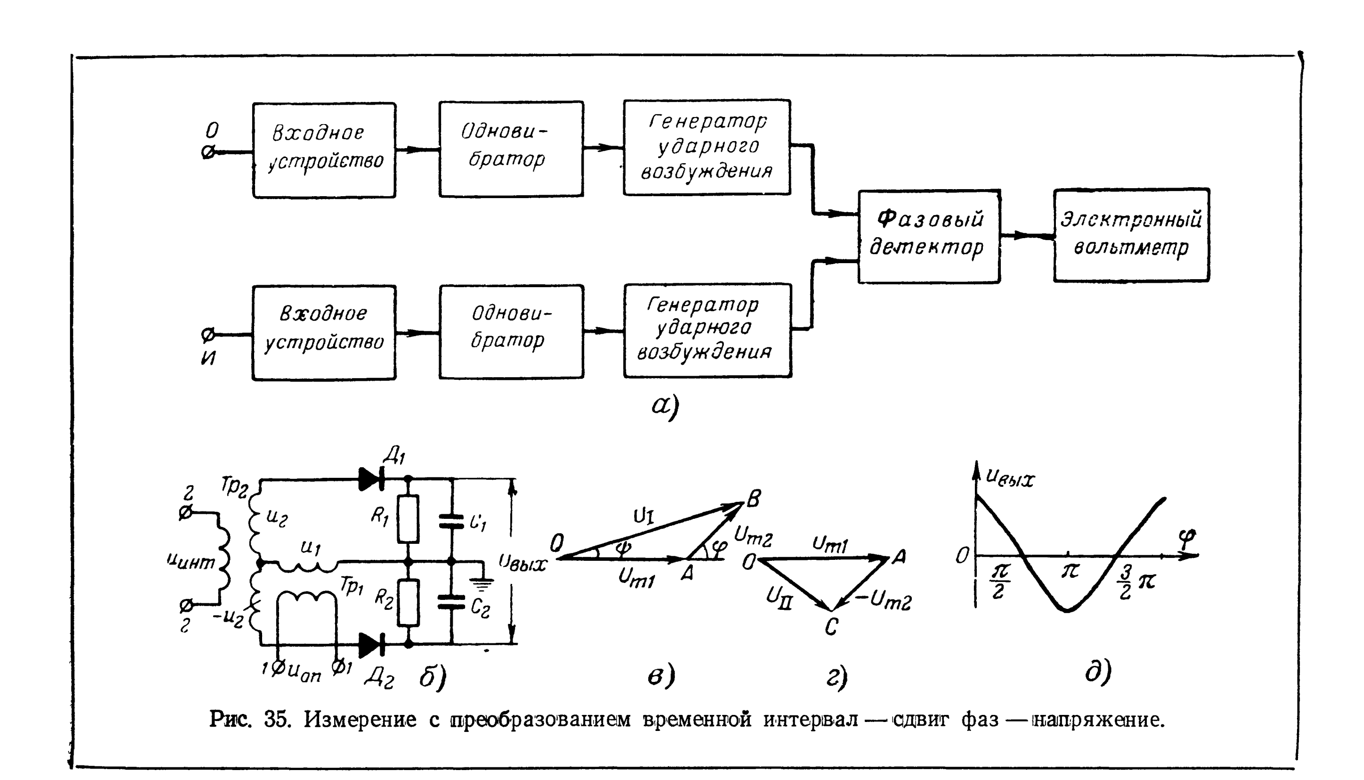


Рис. 35. Измерение с преобразованием временной интервал — сдвиг фаз — напряжение.

Пакеты высокочастотных колебаний генераторов обоих каналов, имеющих одинаковую частоту, подаются на два входа фазового детектора, выходное напряжение которого однозначно соответствует разности фаз напряжений, действующих на входах. На выходе фазового детектора образуется импульс (рис. 36,*е*), длительность которого равна длительности совпадающих частей пакетов высокочастотных колебаний, а амплитуда зависит от разности их фаз. Амплитуда импульса измеряется электронным вольтметром, шкала которого проградуирована в единицах времени. Если измеряется неповторяющийся временной интервал, то на выходе фазового детектора предусматривается запоминающее устройство, а напряжение измеряется вольтметром постоянного напряжения.

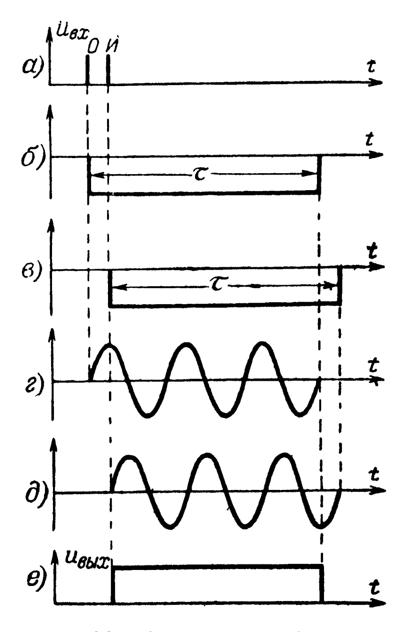


Рис. 36. Принцип преобразования временной интервал — сдвиг фаз — напряжение.

Разрешающая способность устройства зависит главным образом от разрешающей способности $\Delta\varphi$ фазового детектора и частоты колебаний f генератора ударного возбуждения. Это следует из выражения (28), которое можно переписать так:

$$\varphi = \omega \Delta t = 2\pi f \Delta t.$$

Так как зависимость между сдвигом фаз φ и временным интервалом линейна, очевидно, справедливы соотношения

$$\left.\begin{aligned} \varphi_1 &= 2\pi f \Delta t_1; \\ \varphi_2 &= 2\pi f \Delta t_2 \end{aligned}\right\} \qquad (29)$$

и

$$\Delta\varphi = 2\pi f \Delta(\Delta t), \qquad (30)$$

где $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$, а $\Delta(\Delta t) = \Delta t_1 - \Delta t_2$.

По определению разрешающая способность — это минимальная разность двух однородных величин, которая может быть различима прибором. Следовательно, разрешающая спо-

собность прибора, измеряющего временной интервал, может быть определена по формуле

$$\Delta(\Delta t) = \frac{1}{2\pi f}\Delta\varphi, \tag{31}$$

или

$$\Delta(\Delta t) = \frac{1}{360f}\Delta\varphi^{\circ}, \tag{32}$$

из которой видно, что разрешающая способность тем выше [величина $\Delta(\Delta t)$ тем меньше], чем больше частота колебаний f и выше разрешающая способность фазового детектора (меньше величина $\Delta\varphi$).

Так, например, если частота колебаний генератора ударного возбуждения выбрана равной 3 *Мгц*, а разрешающая способность фазового детектора $\Delta\varphi=1^{\circ}$, то разрешающая способность измерителя временных интервалов

$$\Delta(\Delta t) = \frac{1}{360\cdot 3\cdot 10^6} \approx 10^{-9}\ \textit{сек} = 1\ \textit{нсек}.$$

Наиболее эффективна схема балансного фазового детектора (рис. 35,*б*). На вход *1-1* фазового детектора подается гармоническое напряжение $u_{оп}$ из канала опорного импульса, а на вход *2-2* — гармоническое напряжение той же частоты $u_{инт}$ из канала интервального импульса, сдвинутое по фазе относительно первого напряжения на угол φ.

С верхней и нижней половин вторичной обмотки трансформатора $Тр_2$ снимаются противофазные напряжения $u_2 = U_{m2}\times \times \sin(\omega t + \varphi)$ и $-u_2 = -U_{m2}\sin(\omega t + \varphi)$. Поэтому если к диоду $Д_1$ приложена сумма напряжения $u_1 = U_{m1}\sin\omega t$ вторичной обмотки трансформатора $Тр_1$ и напряжения u_2, т. е. $u_{сум} = = u_1 + u_2 = U_{m1}\sin\omega t + U_{m2}\sin(\omega t + \varphi)$, то к диоду $Д_2$ оказывается приложенной разность напряжений $u_{разн} = u_1 - u_2 = = U_{m1}\sin\omega t - U_{m2}\sin(\omega t + \varphi)$.

Обозначив $u_{сум} = U_{\rm I}\cos(\omega t + \psi)$ и $u_{разн} = U_{\rm II}\cos(\omega t - \psi)$ и нарисовав соответствующие векторные диаграммы (рис. 35, *в* и *г*), найдем из треугольников *0АВ* и *0АС*:

$$U_{\rm I} = \sqrt{U_{m1}^2 + U_{m2}^2 + 2U_{m1}U_{m2}\cos\varphi}; \tag{33}$$

$$U_{\rm II} = \sqrt{U_{m1}^2 + U_{m2}^2 - 2U_{m1}U_{m2}\cos\varphi}. \tag{34}$$

В случае, когда $U_{m1} = U_{m2} = U_m$, выражения (33) и (34) принимают вид:

$$U_{\rm I} = \sqrt{2}\,U_m\sqrt{1 + \cos\varphi}; \tag{35}$$

$$U_{II} = \sqrt{2}\,U_m \sqrt{1 - \cos\varphi}. \quad (36)$$

Напряжения $u_{сум}$ и $u_{разн}$ детектируются амплитудными детекторами, выполненными на диодах $Д_1$ и $Д_2$. При условии, что детекторы являются линейными, напряжения на их нагрузках пропорциональны амплитудам U_I и U_{II}, и выходное напряжение фазового детектора

$$u_{вых} = K_д (U_I - U_{II}), \quad (37)$$

где $K_д$ — коэффициент детектирования амплитудного детектора.

Подставив полученные выражения (35) и (36) в формулу (37) и принимая во внимание приближенные соотношения[1]

$\sqrt{1+\cos\varphi} \approx 1 + \frac{\cos\varphi}{2}$ и $\sqrt{1-\cos\varphi} \approx 1 - \frac{\cos\varphi}{2}$, получим

$$u_{вых} = \sqrt{2} K_д U_m \cos\varphi. \quad (38)$$

График зависимости выходного напряжения фазового детектора от сдвига фаз для случая $U_{m1} = U_{m2} = U_m$ приведен на рис. 35,*д*. Из графика видно, что если принять за начальное значение $\varphi = 90°$, то при изменении сдвига фаз в пределах $0 < \varphi < \pi$ с небольшой погрешностью можно считать зависимость $u_{вых}$ от φ линейной.

16. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ВРЕМЕННОЙ ИНТЕРВАЛ — НАПРЯЖЕНИЕ — ВРЕМЕННОЙ ИНТЕРВАЛ

Как было выяснено в § 12, при измерении малых временных интервалов для повышения точности необходимо применять счетчики с высоким быстродействием и генераторы с высокой частотой следования импульсов. Схемы подобных счетчиков получаются весьма сложными. Аппаратуру можно существенно упростить, предварительно «растянув» измеряемый интервал Δt. Очевидно, что если удастся расширить временной интервал в n раз, то во столько же раз уменьшится погрешность дискретности при одном и том же счетчике.

Так, например, если измеряемый интервал $\Delta t = 10$ *мксек*, а в приборе применен семиразрядный счетчик с быстродействием 1 *Мгц*, то интервал Δt будут заполнять всего 10 импульсов. При ошибке дискретности ± 1 импульс (плюс — минус единица младшего разряда счета) относительная погрешность измерения временно́го интервала составит 10%. В случае же «растягивания» интервала до величины $\Delta t = 100$ *мксек* ($n = 10$) при неизменной

[1] Эти соотношения вытекают из формулы бинома Ньютона и они тем точнее, чем ближе угол φ к $\frac{\pi}{2}$, т. е. чем сильнее неравенство $\cos\varphi < 1$.

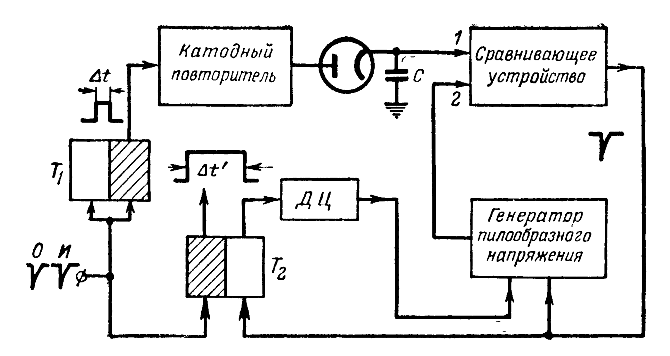


Рис. 37. Функциональная схема прибора для растягивания временного интервала.

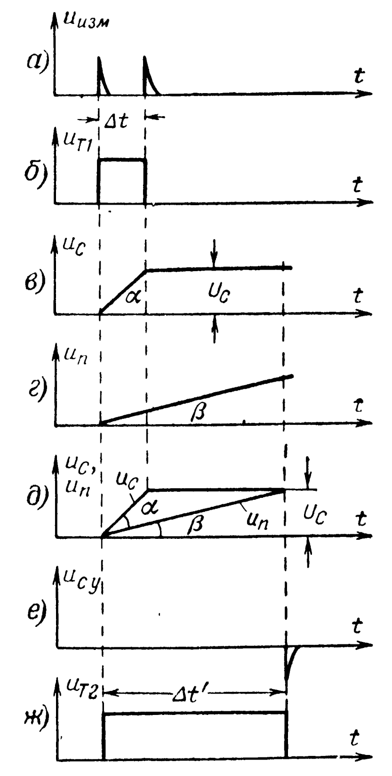


Рис. 38. Принцип растягивания временного интервала.

ошибке дискретности (тот же счетчик) относительная погрешность измерения уменьшается до 1%.

«*Растягивание*» временного интервала получается путем преобразования временной интервал — напряжение — временной интервал. Осуществить это можно с помощью устройства, функциональная схема которого изображена на рис. 37. Работа такого устройства заключается в следующем.

Триггер T_1, на счетный вход которого поступают опорный и интервальный импульсы (рис. 38,*а*), формирует импульс, равный по длительности измеряемому интервалу Δt (рис. 38,*б*). За время действия этого импульса конденсатор C заряжается через насыщенный диод (по линейному закону) до напряжения

$$U_C = \Delta t \cdot \operatorname{tg} \alpha, \tag{39}$$

где $\operatorname{tg} \alpha$ — скорость нарастания напряжения u_C, *в/сек*.

Это напряжение (рис. 38,*в*) сохраняется на обкладках конденсатора практически неизменным в течение некоторого времени, и таким образом, конденсатор служит запоминающим устройством.

Преобразование напряжения U_C во временной интервал достигается с помощью генератора пилообразного напряжения и сравнивающего устройства. В рассматриваемой схеме ко входу *1* сравнивающего устройства подводится напряжение U_C, а ко входу *2* — пилообразное напряжение генератора, работающего в ждущем режиме.

Опорный импульс одновременно с переключением триггера T_1 переключает и триггер T_2. Отрицательный перепад напряжений, который образуется на правом (по схеме) выходе триггера T_2 при переключении его дифференцируется цепочкой *ДЦ*. Получающийся отрицательный импульс запускает генератор, вырабатывающий пилообразное напряжение $U_п$ (рис. 38,*г*), поступающее на вход *2* сравнивающего устройства.

В момент равенства напряжений на входах *1* и *2*, т. е. напряжения на конденсаторе U_C и пилообразного напряжения $U_п$ (рис. 38,*д*), на выходе сравнивающего устройства появляется импульс (рис. 38,*е*). Этот импульс прекращает работу генератора пилообразного напряжения и переключает триггер T_2 в исходное положение. На выходе триггера T_2 формируется импульс длительностью $\Delta t'$.

Как видно из рис. 38,*д*,

$$\Delta t' = \frac{U_C}{\operatorname{tg} \beta}. \tag{40}$$

Подставив в формулу (40) значение напряжения U_C из выражения (39), получим

$$\Delta t' = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \beta} \Delta t = n \Delta t, \tag{41}$$

где $n = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \beta}$.

Для получения высокой точности необходимы триггеры T_1 и T_2 с малым разрешающим временем, высокая степень линейности и стабильности крутизны пилообразного напряжения. Если требуется значительное растяжение временно́го интервала, то можно применить несколько ступеней преобразования временной интервал — напряжение — временной интервал.

17. КОМПЕНСАЦИОННЫЙ МЕТОД

Временны́е интервалы измеряют и компенсационным методом. Основная идея такого метода заключается в сравнении измеряемого интервала с калиброванным. Если не требуется высокая точность, то измерения можно провести по схеме, изображенной на рис. 39,*а*. Эта схема применима в случае, когда интервальный и опорный импульсы поступают от различных источников и периодически повторяются. В результате двух переключений триггера опорным и интервальным импульсами формируется положительный прямоугольный импульс длительностью, равной измеряемому интервалу Δt. Амплитуда импульса U_m строго фиксирована (она задается параметрами схемы триггера). Опорный импульс одновременно с первым переключением триггера запускает и одновибратор. Последний вырабатывает отрицательный прямоугольный импульс, амплитуда которого также равна U_m, а длительность τ, зависящая от параметров схемы, может регулироваться в определенных пределах.

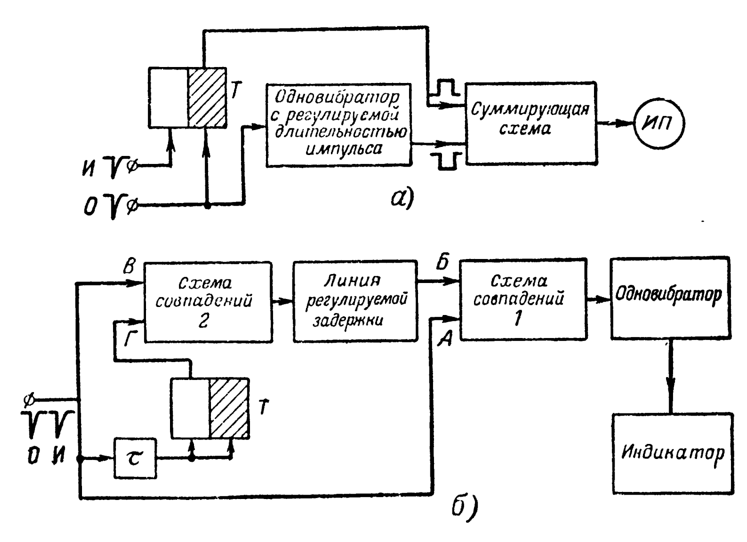


Рис. 39. Функциональные схемы устройств для компенсационных измерений.

Прямоугольные импульсы, вырабатываемые триггером и одновибратором, подаются на два входа суммирующей схемы. На ее выходе получается прямоугольный импульс длительностью $\tau_p = \Delta t - \tau$ и амплитудой U_m. При этом через индикаторный прибор *ИП* протекает средний ток.

$$I = U_m \frac{\tau_p}{T},$$

где T — период повторения опорного и интервального импульсов.

Перед началом измерений параметры схемы одновибратора устанавливают так, чтобы длительность импульса была $\tau_{мин}$ ($\tau_{мин} < \Delta t$). В процессе измерений величину τ увеличивают[1] до получения нулевого показания индикаторного прибора. Это означает, что $\tau_p = 0$ и, следовательно, $\Delta t = \tau$.

Орган регулировки длительности импульса одновибратора снабжен отсчетным устройством, по которому определяют величину τ. Точность измерений определяется главным образом точностью и стабильностью калибровки длительности импульса τ, а также одинаковостью форм и точностью поддержания равенства амплитуд импульсов триггера и одновибратора.

Значительно более высокую точность измерений компенсационным методом позволяет получить устройство, функциональная схема которого приведена на рис. 39,*б*. Это устройство предназначено для измерения периодически повторяющихся временных интервалов Δt, задаваемых опорными и интервальными импульсами, поступающими от одного источника. Его работа заключается в следующем.

Опорный импульс, поступающий на вход *А* схемы совпадений *1*, не проходит на ее выход, так как в это время отсутствует сигнал на входе *Б*. Через схему совпадений *2* опорный импульс, подаваемый на вход *В*, проходит, поскольку вход *Г* подготовлен потенциалом триггера, переключение которого опорным импульсом производится с запаздыванием на время $\tau < \Delta t$. Через калиброванную и регулируемую линию задержки опорный импульс поступает на вход *Б* схемы совпадений *1*. Если время задержки в линии $\tau_з$ отрегулировать так, чтобы $\tau_з = \Delta t$, то момент прихода задержанного опорного импульса на вход *Б* совпадет с моментом прихода на вход *А* незадержанного интервального импульса и на выходе схемы совпадений *1* появится импульс. Последний опрокидывает одновибратор, который зажигает индикаторную неоновую лампу.

Методика измерений сводится к регулировке времени задержки $\tau_з$ опорного импульса в линии задержки до тех пор, пока не загорится неоновая лампа. Определив время $\tau_з$ по отсчетному устройству линии задержки, узнаем измеряемый интервал Δt.

---

[1] Можно применить и такую методику: первоначально установить $\tau_{макс} > \Delta t$ и в процессе измерений уменьшить величину τ до получения $\tau_p = 0$.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ЦИФРОВЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ, ОСНОВАННЫЕ НА ПРЕОБРАЗОВАНИИ ВО ВРЕМЕННОЙ ИНТЕРВАЛ

18. ИЗМЕРЕНИЕ ПЕРИОДА

Период гармонических колебаний можно измерить с помощью прибора для определения временны́х интервалов, описанного в § 12. Для этого необходимо предусмотреть в приборе вместо триггера устройство, преобразующее напряжение измеряемого периода T в стробирующий импульс длительностью T.

Такое устройство состоит из двух частей. В первую часть входят усилитель-ограничитель и дифференцирующая цепочка. Функции этой части устройства сводятся к преобразованию синусоидального напряжения периода T в периодическую последовательность коротких импульсов, период следования которых равен T. Процесс преобразования иллюстрируется рис. 40, на котором символами $u_{у.о}$ и $u_{д.ц}$ соответственно обозначены напряжения на выходах усилителя-ограничителя и дифференцирующей цепочки.

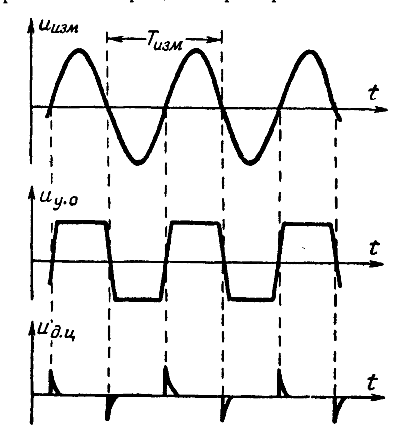


Рис. 40. Преобразование синусоидального напряжения в периодическую последовательность импульсов.

Во второй части устройства формируются «временны́е ворота» из последовательности импульсов, полученных в первой части устройства. Схема формирования «временны́х ворот» выполнена на двух триггерах (рис. 41). В исходном состоянии схемы триггер T_1 находится в положении 1 (правая половина заперта), а триггер T_2 — в положении 0 (правая половина отперта).

Триггеры могут переключаться только импульсами отрицательной полярности. Первый отрицательный импульс подается с выхода первой части устройства одновременно на левые входы обоих триггеров На триггер T_2 этот импульс непосредственно не действует, а триггер T_1 он переключает в положение 0. На выходе триггера T_1 возникает отрицательный перепад напряжений. В результате дифференцирования он преобразуется в отрицательный импульс, подаваемый на правый выход триггера T_2 и переключающий его в положение 1. На

выходе триггера T_2 появляется положительный перепад напряжений, который служит фронтом «временны́х ворот» — стробирующего импульса, подаваемого на селектор.

Второй отрицательный импульс, поступающий одновременно на левые входы обоих триггеров, не изменяет состояния равновесия триггера T_1, но переключает триггер T_2 в положение 0. Напряжение на выходе триггера T_2 падает, и таким образом,

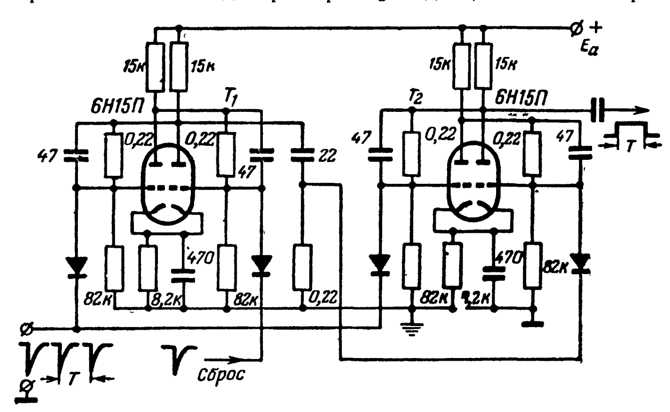


Рис. 41. Схема формирования стробирующих импульсов.

формируется спад «временны́х ворот» Второй триггер также становится нечувствительным к отрицательным запускающим импульсам. Следовательно, после прихода первых двух отрицательных импульсов триггеры не реагируют на остальные импульсы, поступающие на вход схемы формирования временны́х ворот. Они остаются в таком состоянии до тех пор, пока на правый вход триггера T_1 не будет подан отрицательный импульс сброса, возвращающий этот триггер в первоначальное положение и подготавливающий схему к новому формированию «временны́х ворот».

Импульс, формируемый на выходе триггера T_2 и передаваемый на селектор, имеет длительность, равную промежутку времени между двумя импульсами, поступившими на вход схемы, т. е. измеряемому периоду T. Вырабатываемый триггером T_2 прямоугольный стробирующий импульс открывает на время T счетчик, считающий импульсы генератора с известной частотой следования.

Методика измерения периода не отличается от методики измерения временно́го интервала, изложенной в § 12. Погрешность измерения периода зависит от факторов, определяющих погрешности измерения временно́го интервала, а также от нестабильности момента срабатывания устройства, преобразующего синусоидальное напряжение в последовательность импульсов. В результате этой нестабильности период следования коротких импульсов, которые формируют временны́е ворота, может отличаться от измеряемого периода синусоидального напряжения.

19. ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ

Сначала рассмотрим метод измерения частоты следования F_c импульсов. Эта задача обратна задаче измерения временнóго интервала с помощью электронного счетчика. Измерение временнóго интервала Δt методом дискретного счета заключалось в сравнении неизвестного интервала Δt_x с известным периодом T_c следования импульсов. Сравнение достигалось подсчетом числа m импульсов, заполняющих интервал Δt_x. Измеряемый интервал определяется по формуле $\Delta t_x = mT_c = \frac{m}{F_c}$.

Аналогичное сравнение можно провести, «изменив роли» величин Δt и T_c. Предположим, что сформированы «временны́е ворота», ширина которых $\Delta t_к$ калибрована и известна. Если мы заполним эти ворота импульсами, следующими с неизвестным периодом T_{cx} (с частотой F_{cx}), то, подсчитав число импульсов, попадающих в калиброванные «ворота», получим

$$n = \frac{\Delta t_к}{T_{cx}} = \Delta t_к F_{cx},$$

или

$$F_{cx} = \frac{n}{\Delta t_к}. \tag{42}$$

Если принять $\Delta t_к = 1$ *сек*, то $F_{cx} = n$.

Очевидно, что таким же способом можно измерить и частоту гармонического напряжения. В этом случае необходимо предварительно преобразовать гармоническое напряжение с частотой f_x (периода T_x) в периодическую последовательность коротких импульсов с частотой следования f_x.

Измерения частоты проводятся устройством, упрощенная функциональная схема которого изображена на рис. 42. Формирующее устройство преобразует синусоидальное напряжение измеряемой частоты, поступающее на вход устройства, в последовательность однополярных импульсов, частота следования которых равна частоте синусоидального сигнала. Эти импульсы поступают на вход *1* временнóго селектора. Они проходят в счетчик, пока на входе *2* селектора действует стробирующий импульс строго определенной длительности. Последняя задается датчиком калиброванных отрезков времени.

Датчик калиброванных отрезков времени состоит из кварцевого генератора и схемы деления частоты. Кварцевый генератор является источником высокостабильных по частоте колебаний (обычно 100 *кгц*). Схема деления частоты представляет собой набор из M делителей частоты, каждый из которых делит на 10. Общий коэффициент деления получается равным 10^M. Если $M=6$, то с различных выходов схемы деления могут сниматься импульсы напряжения с частотами следования 10 и 1 *кгц*; 100; 10 и 1; 0,1 *гц*. Периоды следования импульсов определяют продолжительности отрезков времени счета, т. е. «временны́е ворота», 0,0001; 0,001; 0,01; 0,1; 1 и 10 *сек*.

Устройство формирования «временны́х ворот» на которое подаются импульсы с одного из делителей, вырабатывает прямоугольный импульс, отпирающий вход счетчика на время $\Delta t_к$. Подобная схема была описана в предыдущем параграфе.

Реле времени индикации и сброса показаний на нуль обеспечивает определенную продолжительность времени индикации результата измерений. Его работа заключается в том, что оно вырабатывает через определенное регулируемое время измерений импульс, возвращающий декады электронного счетчика и триггер T_1 схемы формирования временны́х ворот в начальное

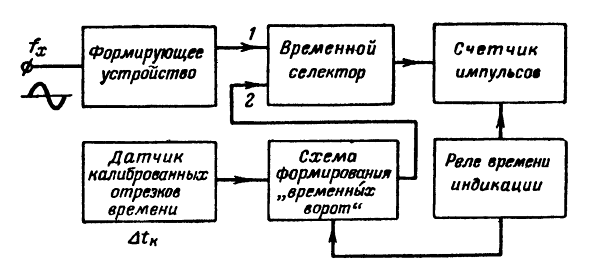


Рис. 42. Упрощенная функциональная схема цифрового частотомера.

положение, т. е. подготавливает устройство к новому измерению. Кроме того, этот импульс держит в запертом состоянии схему формирования временны́х ворот до окончания процесса переключения декад электронного счетчика в начальное положение, т. е. до сброса показаний на нуль.

20. ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ

В последние годы все более широкое применение получают приборы с цифровым отсчетом для измерения напряжений, получившие название цифровых вольтметров. Они позволяют получать значительно более высокую точность измерений, чем дают обычные ламповые вольтметры со стрелочными индикаторами. Наиболее распространенный тип цифровых вольтметров — прибор с время-импульсным преобразованием. Подобный прибор состоит из двух основных частей: устройства преобразования напряжения в пропорциональный ему временной интервал и цифрового измерителя временно́го интервала.

Цифровые вольтметры непосредственно измеряют постоянные или медленно меняющиеся напряжения. Когда необходимо измерять переменное напряжение, дополнительно используют детекторную головку, преобразующую переменное напряжение в постоянное. Упрощенная функциональная схема цифрового вольтметра приведена на рис. 43.

Измерения проводятся циклами. В начале цикла импульс $u_у$ (рис. 44,*а*), вырабатываемый управляющим устройством, сбрасывает на нуль показания счетчика измерителя временно́го

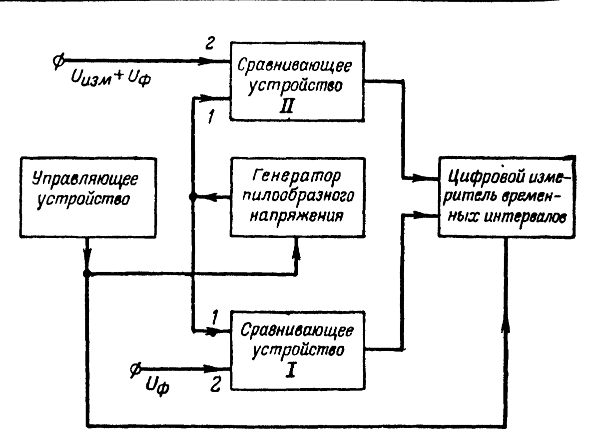


Рис. 43. Упрощенная функциональная схема цифрового вольтметра.

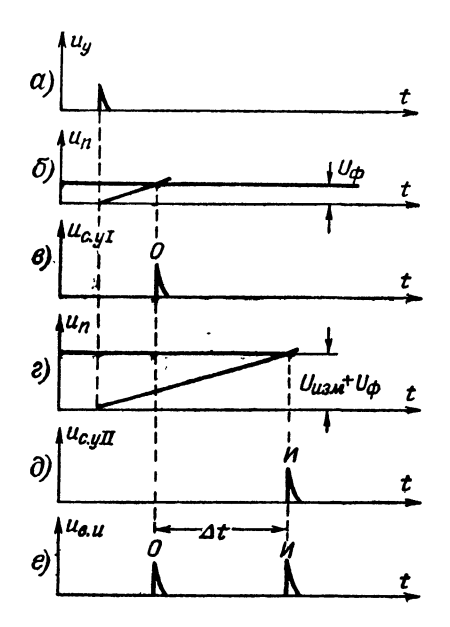


Рис. 44. Принцип преобразования напряжения во временной интервал.

интервала и запускает генератор пилообразного напряжения $u_п$. Последнее подается на входы *1* обоих сравнивающих устройств. Ко входу *2* сравнивающего устройства *I* постоянно приложено фиксированное напряжение $U_ф$ небольшой величины (рис. 44,*б*), задающее первый уровень сравнения. На вход *2* сравнивающего устройства *II* поступает сумма напряжений фиксированного $U_ф$ и измеряемого $U_{изм}$ (рис. 44,*г*), определяющая второй уровень сравнения. Когда пилообразное напряжение становится равным $U_ф$ (рис. 44, *б*), на выходе сравнивающего устройства *I* появляется импульс $u_{с.уI}$. Этот импульс (рис. 44,*в*) служит опорным импульсом временно́го интервала Δt, в который преобразуется измеряемое напряжение. В момент равенства пилообразного напряжения суммарному $U_{изм}+U_ф$ (рис. 44,*г*) возникает импульс $u_{с.уII}$ (рис. 44,*д*) на выходе сравнивающего устройства *II*. Он является интервальным импульсом. Полученный временной интервал Δt (рис. 44,*е*), прямо пропорциональный напряжению $U_{изм}$, измеряется цифровым измерителем временны́х интервалов.

Основные источники ошибок описанного цифрового вольтметра: недостаточно высокая линейность пилообразного напряжения и нестабильность крутизны этого напряжения; конечная чувствительность и нестабильность работы сравнивающих устройств; нестабильность частоты следования импульсов, фиксируемых счетчиком; погрешность дискретности (ошибка на единицу младшего разряда счета).

21. ИЗМЕРЕНИЕ СДВИГА ФАЗ

Два синусоидальных напряжения u_1 и u_2 преобразуются с помощью двухканального формирующего устройства (рис. 45) в короткие импульсы, временно́е положение которых соответ-

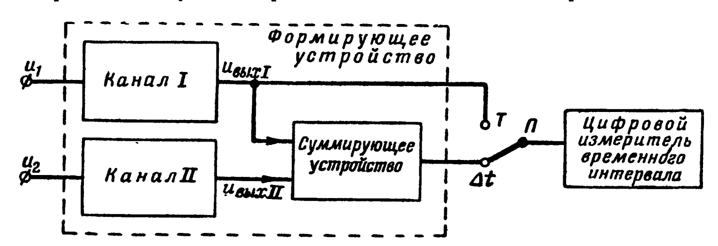


Рис. 45. Функциональная схема цифрового фазометра.

ствует моментам переходов синусоид через нуль. После сложения в суммирующем устройстве получают две разнополярные серии парных импульсов ($u_{сум}$). В каждой паре импульсы сдвинуты на время Δt (рис. 46).

Измеряемый сдвиг фаз φ связан с временны́м интервалом Δt зависимостью

$$\varphi^\circ = 360 \frac{\Delta t}{T}. \tag{43}$$

Из выражения (43) непосредственно вытекает методика измерения сдвига фаз цифровым методом. Сначала измеряют период T исследуемого синусоидального напряжения. Для этого переключатель Π ставят в положение T (рис. 45). Тогда на вход цифрового измерителя, точнее на вход устройства формирования временных ворот, описанного в § 18, подаются импульсы с выхода канала I формирующего устройства. Прибор измеряет временной интервал между импульсами, равный периоду T синусоидального напряжения (рис. 46). Далее переключатель Π переводят в положение Δt и измеряют временной интервал между двумя импульсами, образующимися на выходе суммирующей схемы. Сдвиг фаз вычисляют по формуле (43).

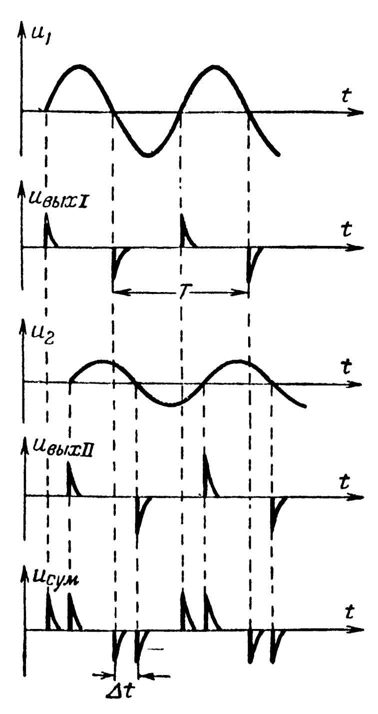


Рис. 46. К принципу измерения сдвига фаз.

Чтобы избежать вычислений, иногда при измерении периода T устанавливают такую частоту следования F_c вспомогательных импульсов, чтобы отсчет по прибору $m = TF_c$ представлял собой число, равное $360 \cdot 10^k$. Тогда измеряемый сдвиг фаз φ будет связан с отсчетом n, получаемым при измерении интервала Δt, формулой, не требующей вычислений:

$$\varphi = 360 \frac{n}{m} = \frac{n}{10^k}. \qquad (44)$$

Например, если $T = 0{,}01$ *сек* и $F_c = 360$ *кгц*, то $m = 360 \cdot 10^1$. Тогда $\varphi^\circ = \frac{n}{10}$ и ошибка на один импульс составляет $0{,}1^\circ$.

Описанный способ дает возможность получить высокую точность измерений при низких (сотни герц) и инфранизких (доли герца) частотах. Измерения на высоких частотах с малыми погрешностями связаны со значительным усложнением аппаратуры.

СОДЕРЖАНИЕ

Цена 19 коп.